

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

**Přehřívák vzduchu plynové turbíny
u energetické centrály s akumulací elektřiny
(EC CAES) s horkovodním kotlem**

*Gas Turbine Air Preheater at the Power Station with
Electricity Storage (EC CAES) with the Hotwater Boiler*

Student:

Bc. Ondřej Baron

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Ladislav Vilimec

Ostrava 2018

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Baron**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Přehřívák vzduchu plynové turbíny u energetické centrály s akumulací elektřiny (EC CAES) s horkovodním kotlem**
Gas Turbine Air Preheater at the Power Station with Electricity Storage (EC CAES) with the Hotwater Boiler

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Navrhnete ohřev vzduchu u expanzní plynové turbíny a pro ohřev využijte teplo spalin odebíraných z horkovodního kotle.

Rozsah práce:

1. Popište funkci EC CAES s horkovodním kotlem.
2. Stanovte minimální množství spalin pro ohřev vzduchu při spalování ZP.
3. Proveďte tepelný výpočet přehřevu vzduchu.
4. Vypracujte P/I schéma zapojení přehřevu vzduchu a navrhnete základní RO.
5. Vypracujte výpočtový projekt přehřevu vzduchu.

Seznam doporučené odborné literatury:

Dlouhý, T.: Výpočty kotlů a spalínových výměníků, skripta ČVUT Praha, 2002. ISBN 80-01-02591-8.
ON 070417 Tepelný výpočet parných kotlov, 1984
Firemní literatura fy ORGREZ
PV 2016-343 Trubkový ohřívák plynů uspořádaný z trubkových desek propojených komorami.
Vilimec, L.: Řízení a regulace energetických zařízení. Skripta VŠB TU Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1853-5

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ladislav Vilimec**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. 5. 2018



.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB–TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB–TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB–TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB–TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB–TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB–TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. 5. 2018



.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Ondřej Baron

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Ostravice 616

738 14 Ostravice

Anotace

BARON, O. *Přehřívák vzduchu plynové turbíny u energetické centrály s akumulací elektřiny (EC CAES) s horkovodním kotlem*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2018, 79 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Vilimec.

Tato diplomová práce je zaměřena na možnosti akumulace elektrické energie, její skladování a následné využití. Hlavním předmětem práce je vypracování výpočtového projektu přehřevu vzduchu v horkovodním kotli u energetické centrály s akumulací. Úvodní část popisuje možné technologie akumulace elektrické energie. Část druhá je věnována technologii Akumulace energie ve stlačeném vzduchu (CAES), na jejímž vývoji se podílí VŠB–TUO a společnost ORGREZ, a.s. Praktická část objasňuje tepelné výpočty přehřevu vzduchu, návrh spalovací komory horkovodního kotle a návrh koncepce ohříváku vzduchu. V závěru práce je navržen základní regulační obvod, který je zakreslen do P/I schématu. Samotná konstrukce přehříváku vzduchu je znázorněna na přiloženém výkrese.

Klíčová slova: akumulace, CAES, výměník, horkovodní kotel, ohřívák vzduchu

Annotation

BARON, O. *Gas Turbine Air Preheater at the Power Station with Electricity Storage (EC CAES) with the Hotwater Boiler*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2018, 80 pages. Thesis head: doc. Ing. Ladislav Vilimec.

This thesis is focused on the possibility of energy accumulation, its storage and subsequent use. The main subject of the thesis is to develop a project of air preheater in the hot water boiler at the power station with electricity storage. The first part describes possible energy storage technologies. The second part is devoted to the Compressed Air Energy Storage (CAES), which has been developed by VŠB–TUO and ORGREZ, a.s. The practical part explains the thermal calculations of air preheating, the design of the combustion chamber of the hot water boiler and the design of the air heater concept. Basic regulation circuit, which is drawn in the P/I diagram, is designed at the end of the thesis. The construction of the air preheater itself is illustrated in the attached drawing.

Keywords: electricity storage, CAES, heat exchanger, hot water boiler, air preheater

Poděkování

Rád bych poděkoval především svému vedoucímu panu doc. Ing. Ladislavu Vilimcovi za odborné vedení této práce, cenné připomínky při jejím zpracování a ochotu při řešení všech dílčích odborných problémů.

Dále děkuji své rodině, zvláště rodičům a své přítelkyni, kteří mi byli vždy po dobu studia velkou oporou.

Obsah

Seznam použitých zkratk.....	10
Seznam použitých veličin a symbolů	11
Seznam zadaných hodnot a parametrů	15
1. Úvod.....	16
2. Téma akumulace elektrické energie	17
2.1 Technologie akumulace elektrické energie.....	19
2.1.1 Mechanické akumulátory.....	20
2.1.2 Elektromagnetické akumulátory.....	24
2.1.3 Elektrochemické akumulátory	24
2.2 Celkové zhodnocení variant akumulačních technologií	27
3. EC CAES s horkovodním kotlem	29
3.1 Modely koncepce EC CAES.....	30
3.1.1 Provedení s kogenerační jednotkou s plynovou turbínou (EC CAES – KGJ)	30
3.1.2 Provedení s horkovodním kotlem (EC CAES – HWB)	31
3.2 Provozní režimy EC CAES – HWB (s horkovodním kotlem)	32
3.2.1 Klasický režim	32
3.2.2 Režim nabíjení (akumulace)	33
3.2.3 Režim vybíjení (výroba špičkové elektrické energie).....	33
4. Stechiometrie	36
5. Tepelný výpočet předehřevu vzduchu.....	40
5.1 Výpočet množství paliva	42
5.2 Výrobní teplo kotle	44

6. Tepelné ztráty kotle.....	47
6.1 Ztráta chemickým nedopalem.....	47
6.2 Ztráta sáláním a vedením do okolí.....	47
6.3 Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová).....	48
6.4 Celkové tepelné ztráty kotle	49
7. Účinnost kotle	50
8. Výpočtový projekt přehřevu vzduchu.....	51
8.1 Návrh spalovací komory	51
8.2 Návrh ohříváku vzduchu.....	54
8.2.1 <i>Součinitel přestupu tepla konvekci na straně vzduchu (podélné).....</i>	<i>57</i>
8.2.2 <i>Součinitel přestupu tepla konvekci na straně spalin (příčné)</i>	<i>58</i>
8.2.3 <i>Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin.....</i>	<i>60</i>
8.2.4 <i>Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalin.....</i>	<i>63</i>
8.2.5 <i>Součinitel prostupu tepla.....</i>	<i>63</i>
8.2.6 <i>Teplosměnná plocha ohříváku vzduchu.....</i>	<i>64</i>
8.3 Záměr návrhu.....	67
9. Základní regulační obvod.....	69
9.1 Regulační obvod při výrobě el. energie z akumulace 1	69
9.1.1 <i>Poruchový stav</i>	<i>69</i>
9.2 Regulační obvod při výrobě el. energie z akumulace 2	70
10. Závěr.....	72
11. Seznam použité literatury.....	74
12. Seznam obrázků	76
13. Seznam grafů	78

14. Seznam tabulek.....	79
15. Seznam příloh.....	80

Seznam použitých zkratk

CAES	Akumulace energie ve stlačeném vzduchu (Compressed Air Energy Storage)
EC	Energetická centrála
HWB	Horkovodní kotel (Heat Water Boiler)
JE	Jaderná elektrárna
KGJ	Kogenerační jednotka
LDS	Lokální distribuční síť
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna
VŠB–TUO	Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava

Seznam použitých veličin a symbolů

$\dot{V}_{sp,(N)}$	Objem spalin normálních	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$
C_2H_6	Obsah etanu	$[\%]$
C_3H_8	Obsah propanu	$[\%]$
\dot{m}	Hmotnostní tok	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
O_2	Obsah kyslíku	$[\text{m}]$
$t_{stř}$	Střední teplota	$[^{\circ}\text{C}]$
V_{O_2}	Objem kyslíku	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$
$V_{\text{vz},\text{H}_2\text{O}}$	Objem vodní páry ve spalovacím vzduchu	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$
V_{CO_2}	Objem oxidu uhličitého ve spalinách	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$
V_{N_2}	Objem dusíku ve spalinách	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$
V_{vz}	Objem vzduchu	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$
V_{sp}	Objem vzniklých spalin	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$
$\Delta t_{stř}$	Střední logaritmická hodnota	$[^{\circ}\text{C}]$
CH_4	Obsah methanu	$[\%]$
CO_2	Obsah oxidu uhličitého	$[\%]$
C_s	Korekční součinitel na počet řad	$[-]$
C_z	Korekční součinitel uspořádání	$[-]$
$P_{hoř}$	Výkon hořáků kotle	$[\text{MW}]$
Q_i^r	Výhřevnost	$[\text{MJ m}^{-3}_{\text{N}}]$
S_0	Průřez spalovací komory	$[\text{m}^2]$
$S_{1,(3)}$	Plocha jednoho dílu	$[\text{m}^2]$

S_1	Plocha jednoho svazku	[m ²]
V_{H_2O}	objem vodní páry ve spalínách	[m ³ _N ·m ⁻³ _N]
c_p	Měrná tepelná kapacita	[kJ·m ⁻³ ·K ⁻¹]
$k_s \cdot r_s$	Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny	[-]
p_c	Celkový tlak	[MPa]
q_s	Průřezové zatížení ohniště	[kW · m ⁻²]
q_v	Objemová zatížení ohniště	[kW · m ⁻³]
r_{H_2O}	Objemová koncentrace vodní páry ve spalínách	[-]
r_s	Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalínách	[-]
s	Efektivní tloušťka sálavé vrstvy	[m]
s_1	Příčná rozteč trubek	[mm]
s_2	Podélná rozteč	[mm]
χ_v	Součinitel zvětšení objemu suchého vzduchu	[-]
χ_v	Součinitel vlhkosti vzduchu	[-]
B	Šířka výměníku	[m]
D	Vnější průměr trubky	[m]
d	Vnitřní průměr trubky	[m]
n	Počet dílů	[-]
N	Obsah dusíku	[%]
Q	Výkon	[W]
Re	Reynoldsovo kritérium	[-]
T	Teplota	[K]

t	Teplota	[°C]
α	Přebytek vzduchu	[1]
ρ	Hustota	[kg·m ⁻³]
σ	Poměrná rozteč	[-]
ω	Rychlost vody	[m·s ⁻¹]
A	Výška výměníku po kraj trubky	[m]
H	Výška	[m]
Nu	Nusseltovo kritérium	[-]
Pr	Prandtlovo kritérium	[-]
S	Teplosměnná plocha	[m ²]
f	Průtočný průřez	[m ²]
i	Entalpie	[kJ·kg ⁻¹]
k	Součinitel prostupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
$k \cdot p \cdot s$	Optická hustota spalin	[-]
p''	Parciální tlak vodní páry	[MPa]
w	Rychlost spalin	[m·s ⁻¹]
α	Součinitel přestupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
λ	Součinitel tepelné vodivosti	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
ξ	Součinitel představují tepelnou ztrátu	[-]
ξ	Součinitel využití plochy	[-]
σ	Poměrná rozteč trubek	[-]
ψ	Součinitel kombinovaného proudění	[-]
ω	Součinitel omývání plochy	[-]

ϕ	Relativní vlhkost	[%]
--------	-------------------	-----

Horní index

v Vlhký

s Suchý

Dolní index

c celkový

CO chemický nedopal

K Fyzické teplo spalin

pal Palivo

s Skutečných

$sál$ sáláním

sp Spaliny

$stř$ Střední

SV sdílení tepla do okolí

vz Vzduch

t Teoretických

Seznam zadaných hodnot a parametrů

Složení zemního plynu:

$$CH_4 = 94 \%, \quad C_2H_6 = 3 \%, \quad C_3H_8 = 1 \%, \quad CO_2 = 1 \%, \quad N_2 = 2 \%$$

t_{kotel}	100	[°C]	Výstupní teplota spalin za kotlem
D_{ov}	25	[mm]	Vnější průměr trubky
$O_{2,ref}$	3	[%]	Referenční obsah kyslíku pro plynná paliva
Q_i^r	33,48	[MJ·m ⁻³ _N]	Výhřevnost zemního plynu
$V_{vz,aku}$	5 000	[m ³]	Celkový objem vzduchového akumulátoru
d_{ov}	21	[mm]	Vnitřní průměr trubky
p_c	0,101	[MPa]	Celkový tlak
p_{sp}	0,103	[MPa]	Tlak spalin za spalovací komorou (abs)
$p_{vz,aku}$	4	[MPa]	Tlak vzduchu v plně nabitém akumulátoru (abs)
t_v	25	[°C]	Teplota spalovacího vzduchu na vstupu (vztažná)
α	1,07	[-]	Přebytek vzduchu
ϕ	60	[%]	Relativní vlhkost vzduchu

1. Úvod

Akumulace energie a schopnosti jejího využívání jsou již v dnešní době natolik rozšířeným tématem, že o její problematice zaslechl snad každý. Dokonce během jedné z přednášek v aule VŠB–TUO paní Ing. Dana Drábová, Ph.D., která aktuálně zastává funkci 2. předsedkyně Státního úřadu pro jadernou bezpečnost, pojmenovala čtyři nejvýznamnější energetické revoluce od doby lidstva. Jako první zmínila zvládnutí a „ochočení“ ohně, poté průmyslovou revoluci a dlouhou etapu fosilních paliv, následující třetí, v období od 50. let 20. století, stále probíhající jadernou revoluci a čtvrtou, začínající, v podobě skladování elektrické energie v rozumném množství a za přijatelné peníze.

Již jsme se naučili všemi možnými způsoby elektřinu vyrábět, nyní přichází na řadu potřeba zaměřit se na její skladování a efektivní získání zpět. Jednou z možných technologií akumulace elektrické energie je technologie nazývaná EC CAES (Energetic Central Compressed Air Energy Storage). Jedná se o způsob akumulace přebytků elektrické energie ve formě stlačeného vzduchu u energetických centrál a následné výroby špičkové elektřiny z akumulace. Tato technologie je ve světě již několik let využívána, avšak s nízkou akumulační účinností.

Snahou této práce je vytvoření návrhu patřičného přehříváku vzduchu, který by zajistil dostatečné zvýšení entalpie stlačeného vzduchu a tím dosažení účinnosti akumulace elektřiny až 80 % bez potřeby zvýšení spotřeby paliva u energetického zdroje. Stěžejní část práce je věnována výpočtovému projektu zmiňovaného přehřevu vzduchu a vytvoření koncepčního návrhu horkovodního kotle.

2. Téma akumulace elektrické energie

První střípky shromažďování a uchovávání energie mapujeme již na počátku neolitu ve 4. tisíciletí př. n. l. na území Mezopotámie, Egypta a Asie, v podobě umění předávání energie na hrnčířském kruhu. Zde hrnčíř svou nohou předával kinetickou energii otočnému hrnčířskému stolu, kterou využíval pro tvarování výrobků.

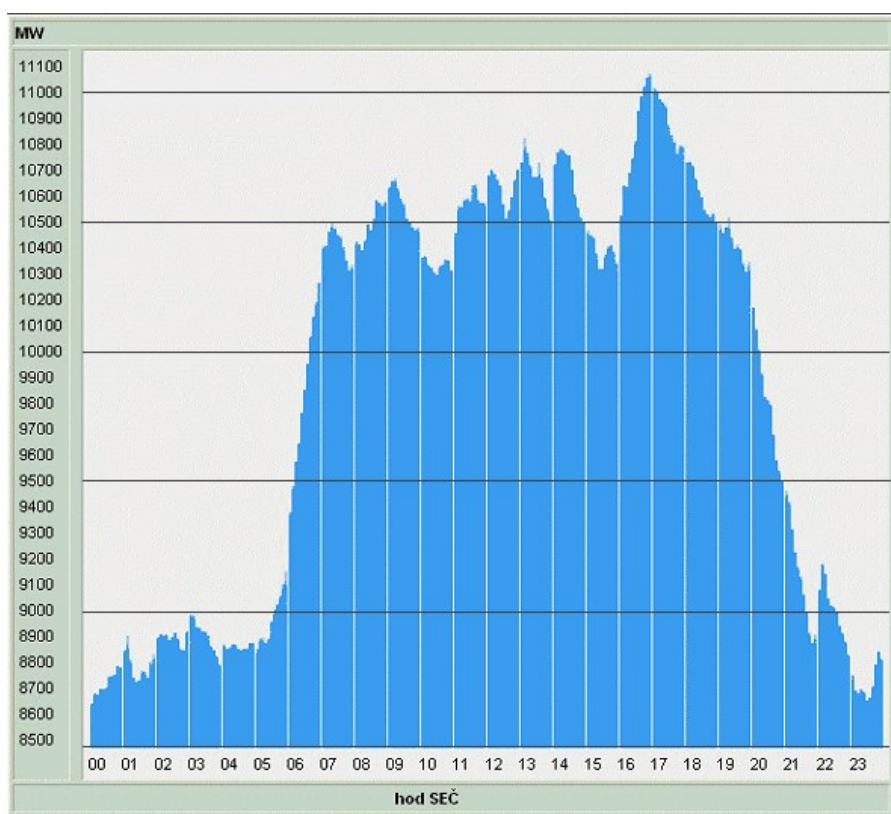
Princip akumulace elektrické energie spočívá také v přeměně její formy na jinou, ve které ji dovedeme efektivněji a snadno skladovat a hlavně v případě potřeby znovu transformovat zpět pro její využití. Jedná se o transformaci energie, s níž je spojeno spoustu vnějších vlivů a faktorů, které nazýváme ztráty.

Nároky na akumulaci se s vývojem doby mění. Několik dekad zpět, kdy byl kladen důraz na ukládání energie do přenosných akumulátorů, se člověk stával flexibilnějším a svobodnějším. To samozřejmě platí i dnes, ovšem s potřebou uchovávat mnohem větší kapacity jednotlivých již nepřenosných akumulátorů a o mnohem větších výkonech. S rychlým vývojem a rozsáhlou modernizací technologií (využívající elektrickou energii) a celkovém nárůstu poptávky po elektrické energii, začaly vznikat problémy v podobě kolísání přenosové soustavy. I zde se jako řešení tohoto problému instalovaly zdroje umožňující akumulaci energie.

Dalším faktorem kolísání přenosové soustavy sítě je stále se zvětšující důraz na dekarbonizaci energetického sektoru a častější využívání obnovitelných zdrojů energií (OZE), které jsou spjaté s problematikou regulace v závislosti na povětrnostních podmínkách, ročním období a denním svitu. Rozdíl mezi získáváním energie z fosilních/jaderných zdrojů a OZE je ve stabilitě produkce nezávislé na přírodních podmínkách, ročním období či geografické poloze. Napříč tomu najíždění uhelného bloku kotlů s roštovým ohništěm ze studeného stavu může trvat v řádu 10 hodin až více dní a u jaderných bloků klidně i týdny, než je blok schopen plnohodnotně dodávat energii do distribuční sítě. Do toho všeho ještě vstupuje koncový zákazník se svou kolísavou spotřebou energie.

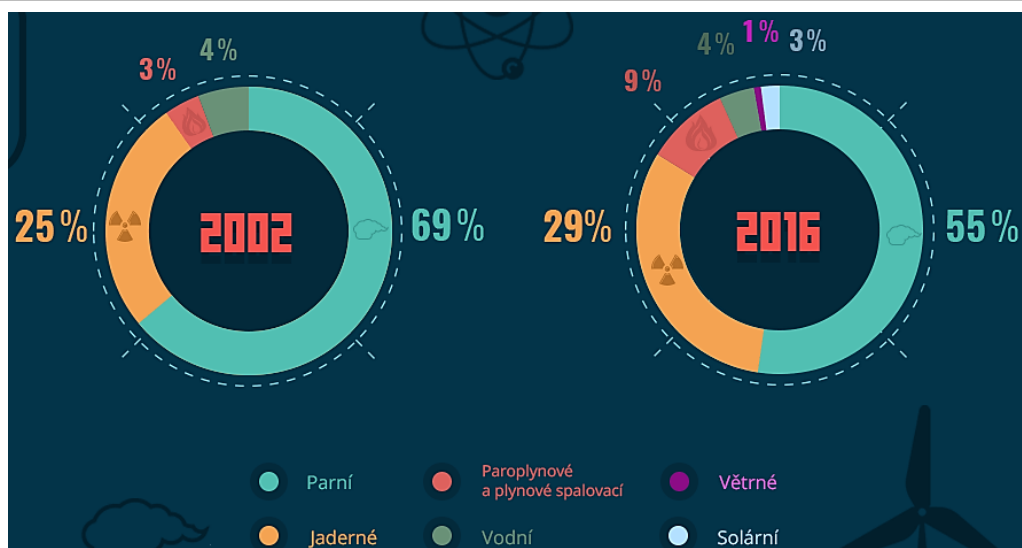
S jistotou můžeme konstatovat, že vyrobená energie nebude nikdy v souladu s energií odebíranou koncovým zákazníkem, vždy zde bude existovat určitá diference. Je to dáno převážně tzv. energetickými špičkami, kterými nazýváme určitá časová období během dne, kdy dochází k náhlým výkyvům odběru elektřiny. Největší energetické špičky se objevují

v centrální soustavě třikrát denně. Jak je vidět z Obr. 1, první nárůst nastává po šesté hodině, kdy začíná ranní směna a pracovníci zahajují provoz továrních strojů, otvírají se školy a kanceláře. Další nárůst spotřeby se objevuje po šesté hodině odpolední, kdy se spouští městské osvětlení. Poslední přichází po dvaadvacáté hodině, kdy se centrálně přepíná levnější tarif a spínají bojler, akumulční kamna a přečerpávací elektrárny.



Obr. 1 Denní průběh spotřeby elektrické energie [8]

V České republice na energetickém poli stále dominují parní elektrárny spalující fosilní paliva. Především hnědohelné elektrárny, které v roce 2016 vyrobily 36,2 TWh elektřiny. Druhým nejvýznamnějším zdrojem ve výrobě elektrické energie jsou naše dvě jaderné elektrárny. Spolu s plynovými a obnovitelnými zdroji zaznamenaly největší nárůst ve „výrobním koláči“. Obnovitelné zdroje jsou zastoupeny především díky rozmachu solární výroby ve fotovoltaických elektrárnách, jak můžeme vidět na Obr. 2.



Obr. 2 Procentuální koláč zdrojů podílejících se na výrobě elektrické energie v ČR [10]

V souvislosti s OZE si tato situace žádá využívání akumulčních systémů, kterých máme nepřeberné množství, ale každý má své výhody a nevýhody, díky nimž jsme nuceni je použít jen v určitých situacích a aplikacích.

2.1 Technologie akumulace elektrické energie

Existuje celá řada způsobů pro akumulaci elektrické energie. Tyto způsoby jsou v literatuře rozdělovány podle různých kritérií, např. podle výkonu, účinnosti akumulace, okamžité kapacity, podle ukládací formy, počtu cyklů, možnosti kombinace, ale taky finanční náročností, což hraje v rentabilitě využívání velkou roli.

Podle formy ukládání energie rozdělujeme akumulční systémy na:

1) Mechanické

- Kinetická energie – setrvačníky,
- Potenciální energie – PVE,
- Tlaková energie – CAES,

2) Elektrické

- Kondenzátory,
- Super kondenzátory,
- Supravodivé technologie – SMES,

3) Elektrochemické

- Klasické akumulátory s elektrolyty,
- Elektrochemické palivové články – REDOX systém,
- Palivové články,

4) Tepelné

- Přírodní materiály,
- Moderní roztavné soli, kryogenika,

5) Chemické

- Vodík, biopaliva, syntézní plyny, syntetický metanol.

V následujících podkapitolách jsou podrobněji popsány technologie mechanické a elektrochemické, jelikož jsou z hlediska konkurenceschopnosti, využitelnosti a podobnosti srovnatelné s technologií akumulace, kterou se zabývá předkládaná diplomová práce.

Další technologie, jako například elektrická, tepelná nebo chemická, jsou naopak rozebrány jen stručně pro doplnění všeobecného přehledu k dané problematice.

2.1.1 Mechanické akumulátory

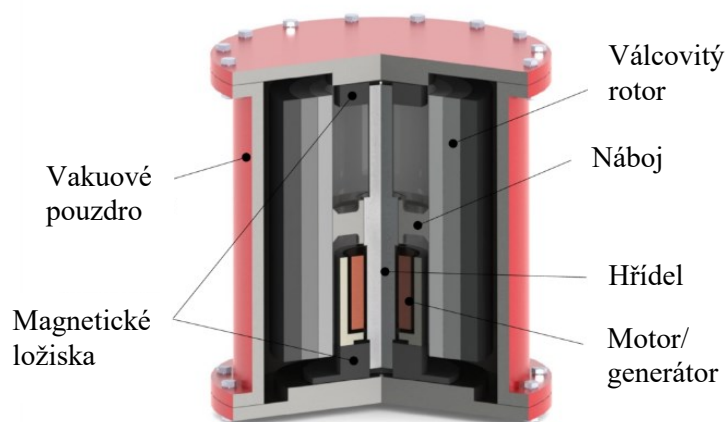
Mechanické akumulátory využívají, jak už je zřejmé z názvu, pro akumulaci mechanickou energii. Jsou to zařízení, která využívají kinetickou nebo potenciální energii. V této kapitole si jednotlivé mechanické akumulátory stručně popíšeme.

Setrvačnickové systémy

Jedná se historicky o jeden z prvních systémů akumulace, který je nám známý. Jak jsme popisovali již v úvodu, bavíme se o prastarém hrnčířském stroji. V dnešní době se však se setrvačníky setkáváme denně, aniž bychom si to uvědomovali. A to už od dětství u setrvačnickových autíček a na principu setrvačnicku pracuje i jojo a káča.

Dále se setrvačníky používají u pohonného soustrojí v hybridních vozidlech. Při brždění akumulují tíhovou sílu a zpětně ji využívají při akceleraci. Dalšími velkými setrvačníky můžeme nazvat samotná kosmická tělesa, například Zemi. V průmyslu využíváme

setrvačnickový systémy především u spalovacích motorů, např. pro vyrovnávání chodu motoru, anebo pro překonání kompresního zdvihu.



Obr. 3 Řez součástí typického magnetického setrvačnicku [11]

Na Obr. 3 vidíme typický setrvačnick. Jde o rotační zařízení využívající momentu setrvačnosti pro akumulaci kinetické energie otáčejícího se rotoru. Velkou předností těchto systémů jsou velké výkony se spotřebou nízké energie a rychlé změny orientace.

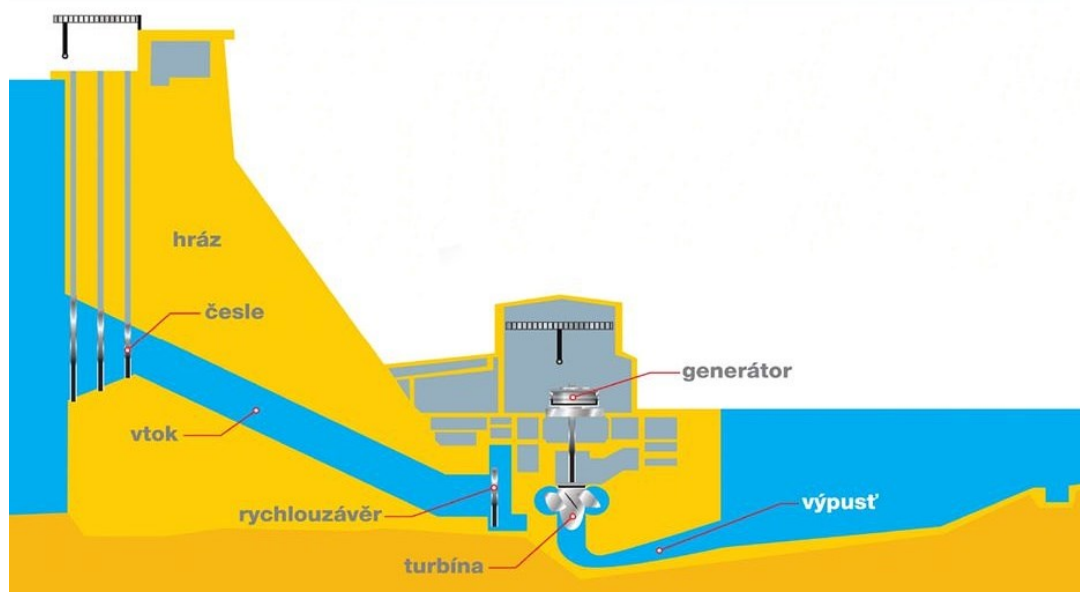
Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárnou (PVE) neboli zjednodušeně řečeno výkonnou a velkokapacitní baterku lze nazvat elektrárnu, která slouží jako akumulací zásobník pro výrobu elektrické energie.

Tato metoda hydraulické akumulace elektrické energie je využívána téměř 100 let. Největší rozmach nastal v době rozvoje instalace jaderných elektráren (dále jen JE). Regulace JE není technologicky i ekonomicky efektivní záležitostí. Proto byly PVE využívány především k vyrovnání poptávky po elektřině v soustavě. Dnes jejich význam roste zejména kvůli implementaci OZE, jejichž výroba je díky povětrnostním podmínkám nepředvídatelná a dochází k výrazným výkyvům v elektrizační síti.

Hlavní technologickou předností PVE je, že dokážou díky velmi rychlému nasetí výroby dodávat elektřinu do sítě během několika sekund. Konstrukčně se jedná o soustavu minimálně dvou vodních nádrží (horní a dolní), které jsou spojeny potrubím. Horní nádrž slouží jako akumulací ve formě potenciální energie načerpané vody. V případě potřeby

výroby elektřiny je voda v horní nádrži uvolněna a pomocí potrubí je voda odváděna na lopatky turbíny připojené na generátor, jak je možné vidět na Obr. 4.



Obr. 4 Zjednodušené schéma PVE Dalešice [12]

Naopak v době *Off-peak* (mimo špičku), kdy je spotřeba elektřiny stagnující, dochází k čerpání vody ze spodní nádrže do horní. Tento režim (tzv. čerpadlový) lze provádět pomocí čerpadel, popřípadě reverzní (Francisovou) turbínou, která je schopna pracovat jak v turbínovém, tak čerpadlovém provozu, provozované například na PVE Dlouhé Stráně.

Podíl celkové výroby z vodních elektráren vzrostl v současné době od roku 2015 o 3,8 procenta. Největší zásluhou se na tom právě podílely PVE Dlouhé Stráně (716 GWh), Dalešice (454 GWh) a Štěchovice II.

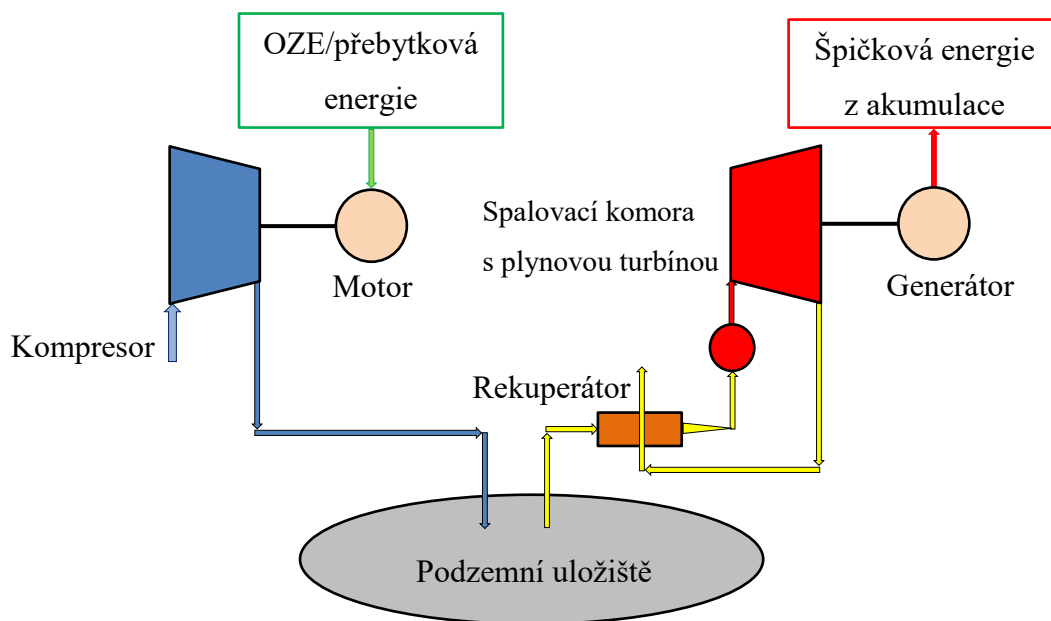
Z tohoto důvodu hrají a nadále i budou hrát přečerpávací vodní elektrárny velkou roli v akumulaci elektřiny a podílení se na vyrovnávání zatížení energetické soustavy.

Technologie CAES

Technologie CAES (Compressed Air Energy Storage) je jakýmsi ekvivalentem systému přečerpávacích vodních elektráren z hlediska jejich principu, výkonu a skladovací kapacity. Namísto potenciální energie (přečerpávání vody z jedné nádrže do druhé) se u této technologie používá jako pracovní médium stlačený vzduch (využívání komprese), který je následně ukládán v podzemních zásobnících nebo plynojemech.

Tento způsob akumulace je využíván několik let a jsou již v provozu akumulační elektrárny o velkých výkonech až 100 MW a dobou akumulace v desítkách hodin. O první větší instalaci se v roce 1978 postarala společnost Brown Boveri (dnešní ABB s.r.o.) v německém Huntorfu o jmenovitém výkonu 290 MW.

Princip CAES technologie je znázorněn na Obr. 5. V době mimo špičku, při přebytku energie například z OZE, je energie spotřebovávána kompresorem a tlakový vzduch se akumuluje v podzemních zásobnících. Naopak při potřebě špičkového elektrického výkonu je vzduch se zásobníků odebírán a používá se jako spalovací vzduch pro plynovou turbínu.



Obr. 5 Schéma principu CAES akumulace

Při kompresi vzduchu dochází k největším ztrátám. Bavíme se o ztrátách tepelných, které ubírají na celkové účinnosti. Tento problém je částečně řešitelný, viz kapitola 8. Existují také další možnosti, jak zvýšit účinnost tohoto systému. Jedním z takových je zapojení rekuperátoru do systému (tím dosáhneme zvyšování entalpie kompresního vzduchu, který následně putuje na plynovou turbínu). Zvýšením entalpie dosáhneme vyšší účinnosti turbíny a zároveň i většího výstupu energie z generátoru.

Probíhající vývoj technologie CAES je zaměřený především na zvýšení účinnosti akumulace, vyvíjí se systémy [15]:

- **AA CAES** (Advanced Adiabatic CAES) – adiabatická komprese vzduchu s využitím akumulovaného kompresního tepla při spouštění a provozu

plynových turbín, dosáhne se zvýšení účinnosti akumulace až na 70 %. Vytváří se vysokoteplotní kompresory a vysokoteplotní rekuperátory tepla (systém Cowper). Projekt Adele, zaštiťovaný firmou RWE s kapacitou 1 GWh a výkonem turbíny 200 MW tedy možností dodávat po dobu pěti hodin špičkovou elektrickou energii do lokální distribuční sítě (dále jen LDS) je jedním z největších projektů v této dané technologii.

- **G CAES** (General Compression Advanced Energy Storage) – texaské sdružení vyvíjí modulový systém pro výkony až 500 MW s izotermickou kompresí a expanzí bez spotřeby zemního plynu s účinností 70 %.
- **LAES** (Liquid Air Energy Storage) – energie se akumuluje ve zkapalněném vzduchu.
- **CAES** – s nadzemními zásobníky pro výkon 15 MW.
- **CAES** – tlakovým médiem je CO₂.

2.1.2 Elektromagnetické akumulátory

Hlavní předností elektromagnetických akumulátorů je, že při akumulaci nedochází ke změně formy energie. Energie je uložena v podobě elektrického náboje.

Jedná se o elektrotechnické součástky složené ze dvou vodivých desek (elektrod), které jsou rozděleny dielektrikem. Na elektrody je přiváděn elektrický náboj opačné polarity, díky čemuž se elektrody začínou k sobě přitahovat. Kondenzátory používáme především v elektronice u operačních pamětí počítačů nebo k použití fotografického blesku.

U klasických kondenzátorů je velkou nevýhodou nízká kapacita, avšak u tzv. superkondenzátorů je už kapacita větší a také výhoda ve vysoké účinnosti a počtu cyklů nabíjení a vybíjení. Můžeme je tedy považovat za jednu z nejlepších možných variant v oblasti akumulace elektrické energie pomocí elektrických akumulátorů.

2.1.3 Elektrochemické akumulátory

Tuto technologii řadíme jako jednu z nejstarších v oblasti akumulace elektrické energie. Princip ukládání elektrické energie je ve formě chemické vazby. Na základě tohoto principu elektrochemické akumulátory rozdělujeme do tří základních skupin, a to na články primární, sekundární a palivové.

- **Primární články** – kvantitativní zdroj elektrochemické energie, uplatňují se především u drobných spotřebičů.
- **Sekundární články** – nejrozšířenější způsob akumulace elektrické energie, má široké možnosti využití akumulace na chemické bázi, jak můžeme vidět na Obr. 6.

akumulátor	celková reakce	svorkové napětí
Pb	$Pb + 2H_2SO_4 + PbO_2 \leftrightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$	2 V
NiCd	$Cd + 2NiO(OH) + 2H_2O \leftrightarrow Cd(OH)_2 + 2Ni(OH)_2$	1,2 V
NiMH	$MH + NiO(OH) \leftrightarrow M + Ni(OH)_2$	1,2 V
NiZn	$Zn + 2NiO(OH) + H_2O \leftrightarrow ZnO + 2Ni(OH)_2$	1,6 V
NaS	$2Na + nS \leftrightarrow Na_2S_n \quad (4 > n \geq 2)$	2 V
Li-ion	$\frac{Li_1}{2}CoO_2 + \frac{Li_1}{2}C_6 \leftrightarrow C_6 + LiCoO_2$	3,6 V ¹⁾

Obr. 6 Přehled chemických reakcí a svorkového napětí vybraných typů akumulátorů [13]

Olověné akumulátory

Řadíme je mezi nejstarší a nejvíce rozšířené akumulátory. Klasický olověný akumulátor je tvořen plastovým obalem, ve kterém jsou uloženy páry olověných desek (kladné a záporné) ponořených do kyseliny sírové. Postupně je sice vytlačují Li-Ion akumulátory, ale ty jsou mnohem méně odolné vůči nízkým teplotám. Nevýhodou olověných akumulátorů je náchylnost na úplné vybití, počet cyklů a velikost. Také z ekologického hlediska můžeme brát tyto akumulátory jako nebezpečné, především díky olovu a kadmii.

Největší zastoupení mají tyto baterie při použití v automobilech a u solárních a větrných elektráren.

NiCd akumulátory

Tyto akumulátory řadíme do skupiny alkalických. Jako elektrolyt se zde používá hydroxid draselný. Chemickou reakci můžeme vyčíst Obr. 6 (viz výše). V dnešní době již není akumulátor tak popularizovaný, jak tomu bývalo kdysi, nicméně stále oplývá vlastnostmi, jež u jiných akumulátorů nejsou tak snadno docílitelné jako např. velmi malý vnitřní odpor, možnost úplného vybití aj.

Dříve byly NiCd akumulátory hojně používány pro mobilní elektroniku a průmyslové

náradí. Z důvodu paměťového efektu a obsahu kadmia jsou postupně nahrazovány jinými typy akumulátorů.

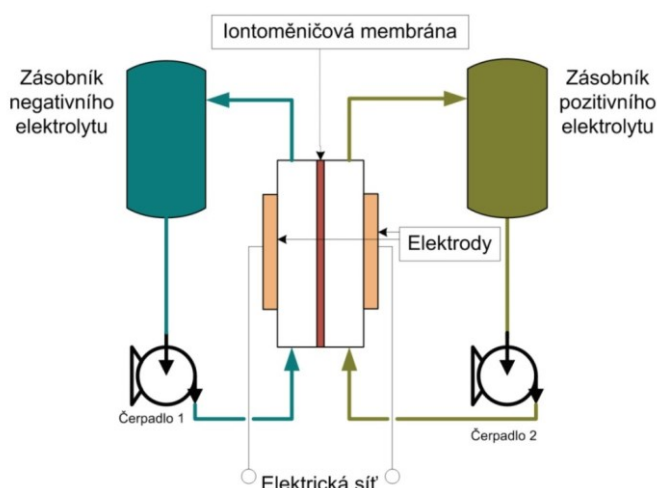
Li-ion akumulátory

Jedná se o akumulátory pracující na přenosu lithiového iontu Li^+ v prostředí bezvodého elektrolytu (většinou lithiová sůl). Dnes jsou nejrozšířenější v oblasti komerční elektroniky. Nahrazují NiCd akumulátory, tak i olověné. Hlavními přednostmi je velká hustota energie, žádný paměťový efekt a velmi nízké samovybíjení a nízká hmotnost.

V listopadu roku 2017 dokonce skupina Solar Global Storage, a.s., připojila k veřejné síti první velkou stacionární baterii fungující právě na bázi Li-ion akumulátorů. Její celková kapacita činí 1,2 MWh a stojí v areálu solární elektrárny v obci Prakšice (okrese Uherského Hradiště). Slouží při výkyvech distribučních soustav nebo při zvýšené poptávce energií.

Průtokové baterie

Tyto baterie řadíme mezi relativně nový druh článků schopných akumulovat i poměrně velké objemy až v řádech MWh. Od klasických baterií se odlišují skladováním elektrolytu (reaktantu) v extérních zásobnících. To nám dává výhodu skladovat téměř neomezené množství elektrolytu. Avšak maximální odebíraný výkon omezuje reakční oblast akumulátoru. Na Obr. 7 vidíme zjednodušené schéma principu tohoto systému.



Obr. 7 Schéma průtokové baterie [14]

Průtokové baterie se skládají ze dvou zásobníků elektrolytu, čerpadel a reakční oblasti s elektrodami. Z pohledu celkového zhodnocení těchto akumulátorů jak z hlediska

provozního, tak ekonomického jsou tyto akumulátory předurčeny k vyššímu zastoupení na poli akumulace elektrické energie.

2.2 Celkové zhodnocení variant akumulačních technologií

Po přečtení předchozích kapitol už víme, že pro akumulaci elektrické energie můžeme použít mnoho různých variant. Při rozhodnutí o výběru dané technologie záleží na více faktorech, které mohou zásadně ovlivnit daný výběr. Je potřeba si ujasnit, jaké faktory a vlastnosti jsou pro nás rozhodující. Mezi takové hlavní řadíme:

- Účinnost [%]
- Životnost (počet cyklů) [-]
- Investiční náklady [Kč]
- Rozměry [m²]
- Specifická hustota energie [Wh/kg]
- Měrný výkon [W/kg]

Následující Tab. 1 zahrnuje srovnání hlavních výhod, nevýhod a podstatné charakteristiky technologií akumulace elektrické energie.

Technologie	Účinnost [%]	Investiční náklady [USD/kW]	Výhody	Nevýhody
Setrvačníky	90–95	130–500	Vysoký výkon, rychlá odezva	Nízká kapacita
Superkondenzátory	90–95	130–515	Mnoho cyklů nabíjení a vybíjení	Samovybíjení, nízká energetická hustota
SMES	90–95	130–515	Téměř nulové ztráty	Vyšší pořizovací cena
Klasické akumulátory	70–90	100–350	Nižší pořizovací náklady, rozměry	Malá životnost, hloubkové vybití
Průtokové baterie	75–95	130–350	Nízké provozní náklady, vysoká kapacita	Nízká energetická hustota
PVE	50–85	500–4600	Vysoká kapacita i výkon, životnost	Zásah do krajiny, vysoká investice
CAES	30–70	500–1500	Vysoká kapacita i výkon, životnost	Nutnost speciálních místních podmínek

Tab. 1 Základní srovnání technologií akumulace

Z výše uvedené tabulky je patrné, že doposud neexistuje žádný univerzální způsob akumulace elektrické energie, který je nejvýhodnější. Stojí tedy za zvážení všech dostupných možností, jakou technologii budeme pro akumulaci využívat a zároveň jaká bude našim potřebám nejvíce vyhovovat.

V dalších kapitolách se zabýváme již samotným systémem EC CAES (Energy Central Compressed Air Energy Storage), jejím rozdělením, popsáním možných modelů zapojení a taky návrhu na zvýšení celkové účinnosti systému akumulace při výrobě špičkové energie dosahující alespoň 70 %.

3. EC CAES s horkovodním kotlem

Koncepce akumulace elektrické energie vyvíjená VŠB–TU Ostrava a společností ORGREZ, a.s., spadá do kategorie mechanických technologií akumulace. Konkrétně nese název Energetická centrála s akumulací energie ve stlačeném vzduchu (EC CAES).

Hlavní princip technologie CAES byl již nastíněn v předešlých kapitolách. V této kapitole se budeme zabývat akumulací ve spolupráci s klasickým energetickým zdrojem, který již zajišťuje dodávku tepla a elektřiny.

Technologie CAES není univerzálním řešením pro všechny akumulace, proto tuto koncepci přiřazujeme pouze k některým variantám akumulace, hlavně podle tzv. konečného užití, tj. ve kterém místě soustavy se bude zajišťovat spolehlivá dodávka elektřiny, a to:

- **v rámci přenosové soustavy:**

Přenosová soustava se musí zabývat jednak optimalizací (vlastními přebytky), jednak především neřízenou produkcí energie z OZE. Jedná se o výkony v akumulaci v řádech 100 MW po dobu několika hodin. Právě pro tyto případy nejrychleji reagují PVE a systémy CAES.

- **u koncového odběratele:**

Zde opět narážíme na produkci elektřiny z obnovitelných zdrojů. Jejich popularita stále roste – dnes se bavíme o úrovni desítek kW až několika MW s periodou v desítkách hodin. Pro pokrytí těchto hodnot zažívá velký rozmach technologie elektrochemická (akumulátory, baterie, superkapacitory a průtokové baterie).

- **u decentralních zdrojů:**

Tímto je myšleno především řešení optimalizace provozu v regionálních oblastech s nedostatečným nebo kolísavým odběrem, v oblastech těžkého průmyslu (hutě s obloukovými pecemi) a v neposlední řadě v oblastech neřízené výroby elektrické energie z OZE.

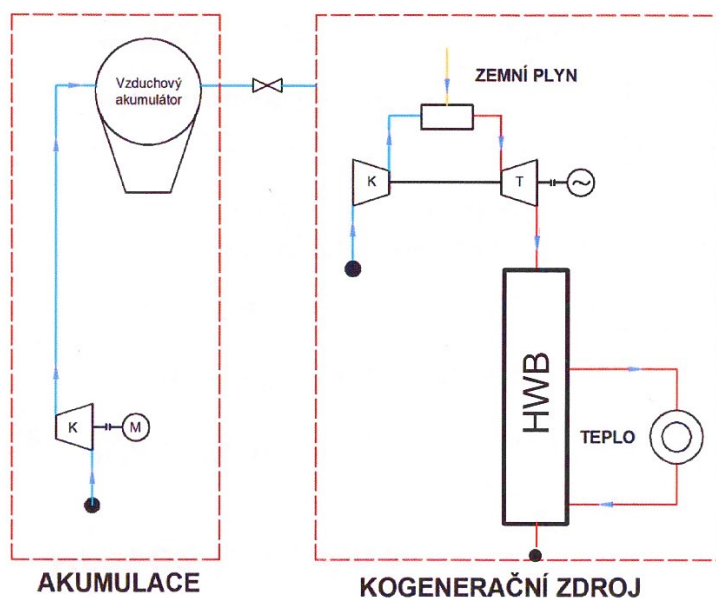
Parametry této koncepce akumulace EC CAES vyhovují spíše potřebám decentralních teplárenských zdrojů, s vyhlídkou do budoucna je určitě reálná i varianta se stabilizací LDS. Také dekarbonizace a rozmach OZE tomu do značné míry přispívá.

3.1 Modely koncepce EC CAES

Budeme-li se tedy dále zabývat pouze akumulací u decentrálních energetických centrál, můžeme uvést možné alternativní modely provedení. Koncepce je navržena jako jednotka tak, aby ji bylo možné připojit třeba již ke klasickému energetickému zdroji. Takovýmto zdrojem může být kogenerační jednotka s plynovou turbínou (EC CAES – KGJ), nebo klasický horkovodní kotel (EC CAES – HWB).

3.1.1 Provedení s kogenerační jednotkou s plynovou turbínou (EC CAES – KGJ)

Toto provedení zapojení je schematicky znázorněno na Obr. 8, kdy je akumulační jednotka napojena na stávající kogenerační zdroj. Tomu se na běžném provozu nic nemění. Do spalovací komory je přiváděn spolu se spalovacím (stlačeným) vzduchem, který je dodáván pomocí kompresoru usazeného na stejné hřídeli jako plynová turbína. Tato směs je spalována a spaliny putují na plynovou turbínu, kde dochází k expanzi a roztočení generátoru. Díky mechanické energii hřídele vytváříme v elektrickém generátoru elektrickou energii.



Obr. 8 Provedení s kogenerační jednotkou s plynovou turbínou (EC CAES – KGJ)[18]

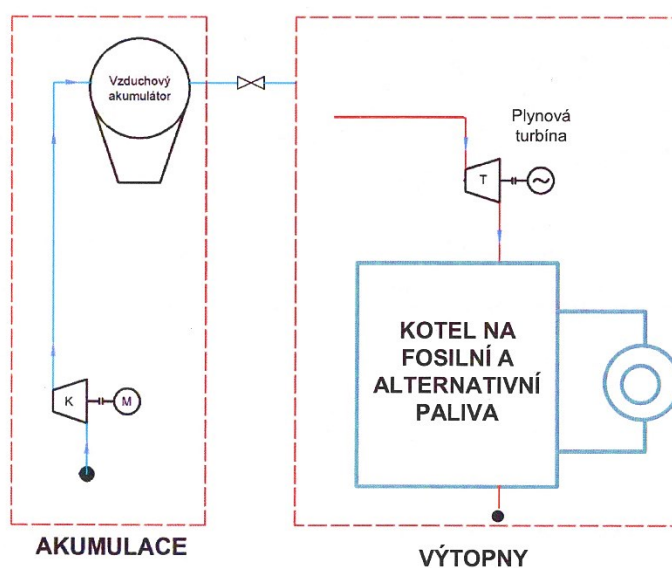
Po expanzi je teplota spalin ještě využívána pro ohřev vody v kotli na odpadní teplo. Ta je dále rozváděna do horkovodní sítě.

V tomto případě není akumulární jednotka využívána, avšak při přebytcích energie v soustavě (způsobené sníženou spotřebou energie či aktivitou OZE), může být jednotka použita pro akumulaci.

Akumulační kompresor spotřebovává přebytečnou energii pro natlačení vzduchu do akumulátoru (plynojemu, kaverny). V případě zapojení kogenerační jednotky můžeme nyní využít jako spalovací vzduch akumulovaný vzduch z plynojemu. Tím ušetříme 55 % – 60 % z vyrobené elektřiny, kterou běžně spotřebovává stávající kompresor. Jednotky jsou samostatné a mohou tedy pracovat nezávisle jedna na druhé.

3.1.2 Provedení s horkovodním kotlem (EC CAES – HWB)

Model koncepce v tomto provedení obsahuje místo kogenerační jednotky klasický horkovodní kotel (Heat Water Boiler) na fosilní a alternativní paliva (výtopna) s přidáním plynové expanzní turbíny s generátorem. Touto variantou se budeme zabývat v následující části této práce. Podstata výroby elektrické energie a akumulace je velice podobná s variantou uvedenou výše. I při tomto provedení mohou jednotky pracovat samostatně, avšak kotel zde bude sloužit pouze jako tepelný zdroj bez výroby elektrické energie.



Obr. 9 Provedení s horkovodním kotlem [18]

Hlavní podstatou akumulace je vrácení energie zpět do sítě s co možná nejvyšší účinností. Toho docílíme připojením akumulární jednotky s plynovou turbínou ke HWB. V tomto případě bude entalpie stlačeného vzduchu o něco nižší než v předešlém případě, ale jsou způsoby, jak ji navýšit. Například těsně před přivedením stlačeného vzduchu na turbínu lze tento akumulovaný vzduch navést skrze přehřívák vzduchu umístěný v horkovodním kotli. Tímto můžeme dosáhnout podobných parametrů jako s kogenerační jednotkou. Návrhem takového přehříváku vzduchu v provedení s horkovodním kotlem a způsobu řízení této varianty EC CAES – HWB se věnujeme v následujících kapitolách.

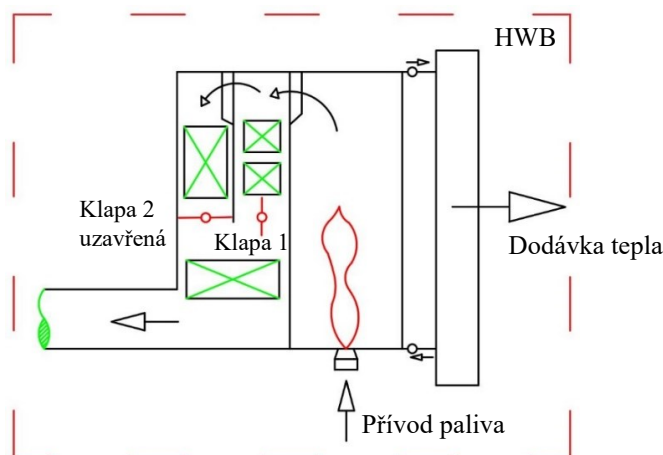
3.2 Provozní režimy EC CAES – HWB (s horkovodním kotlem)

Existují tři režimy provozu s naší variantou EC CAES – HWB. Můžeme si je nazvat jako klasický režim, režim nabíjení (akumulace) a režim vybíjení (výroba špičkové elektrické energie).

3.2.1 Klasický režim

Nazýváme ho klasický, protože stávající tepelný zdroj (výtopna) pracuje ve standardním režimu, jak tomu bylo před zapojením akumulární jednotky. Tedy jsou v horkovodním kotli spalována běžná paliva (plyn, olej, uhlí, alternativní paliva, odpadní plyn) a kotel zajišťuje klasickou dodávku tepla do horkovodní sítě. Klapa 2 je v uzavřené poloze, Klapa 1 otevřená.

- Bez akumulace
- Bez výroby špičkové elektřiny z akumulace

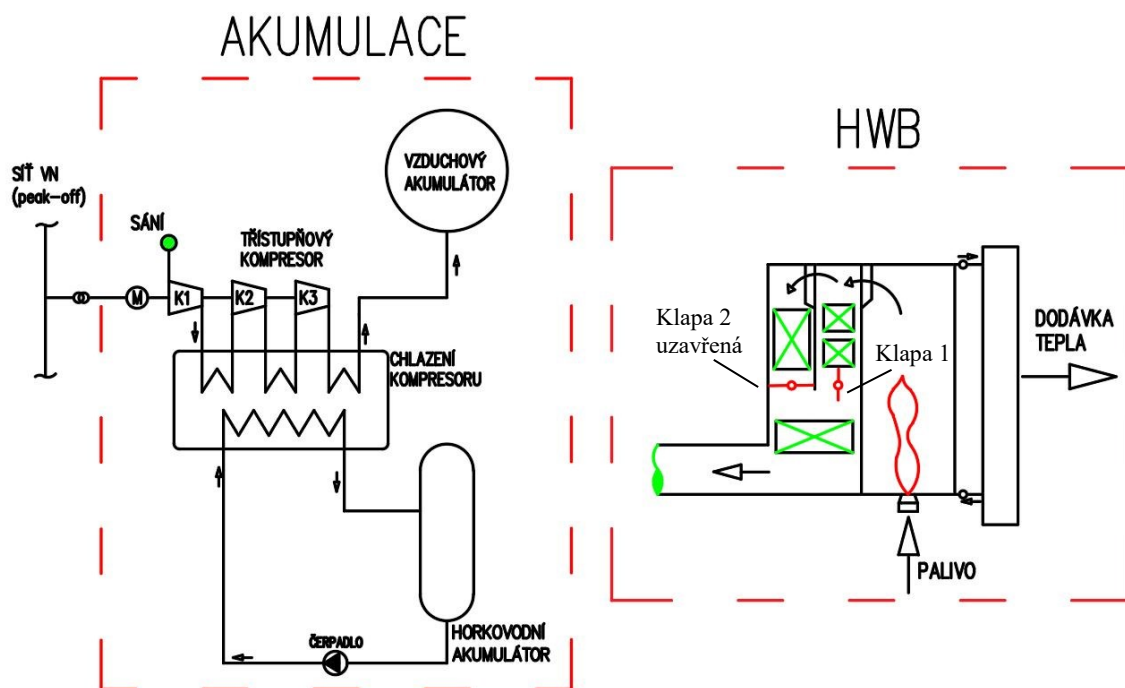


Obr. 10 Schéma klasického režimu HWB

3.2.2 Režim nabíjení (akumulace)

Jak už je zřejmé z názvu, v tomto režimu dochází ke zmíněné akumulaci. Přebytková energie (Peak-off) ze sítě je spotřebovávána vícestupňovým kompresorem s chladiči za každým stupněm a stlačený vzduch je akumulován v zásobníku. Zároveň je v dalším zařízení pro akumulaci tepla z kompresorového chlazení rovněž akumulována i horká voda pro další využití v systému, která vede ke zvýšení požadované účinnosti. Jednotky jsou na sobě nezávislé, a proto můžou pracovat současně nebo jednotlivě. Stále tedy dochází pouze k výrobě tepla stávajícím energetickým zdrojem bez výroby elektřiny.

- Probíhá pouze akumulace, energetický zdroj je odstaven
- Akumulace probíhá současně s klasickým režimem energetického zdroje (HWB)



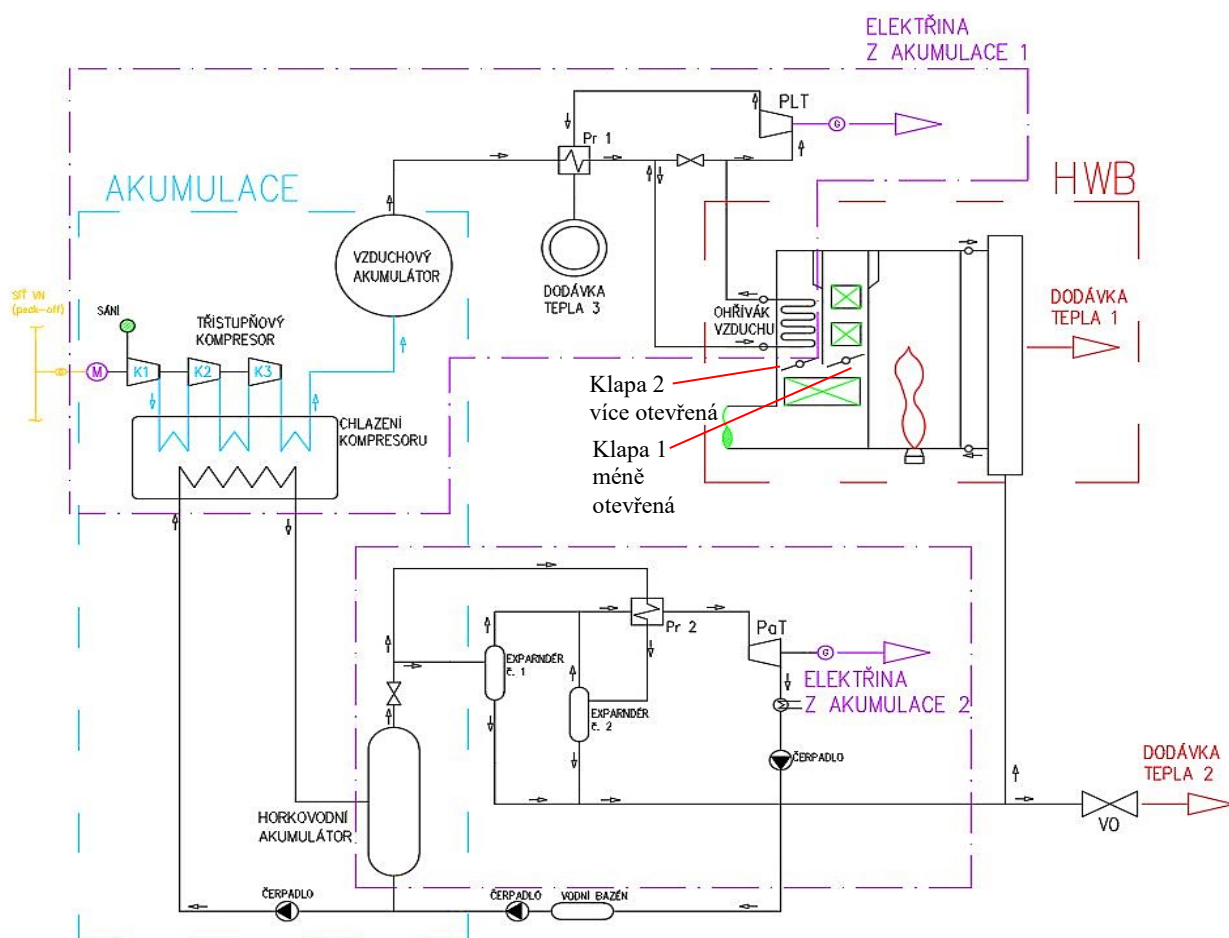
Obr. 11 Schéma režimu nabíjení (akumulace)

3.2.3 Režim vybíjení (výroba špičkové elektrické energie)

Abychom dosáhli požadovaného výsledku, výroby tepla i elektřiny zároveň, tzv. kogenerace, je potřeba, aby obě dvě jednotky byly v provozu. Zjednodušené schéma najdeme na další straně, kde lépe pochopíme celý princip výroby elektrické energie z akumulace.

Zároveň odebíráme horkou vodu z horkovodního akumulátoru získanou chlazením kompresoru a přivádíme ji do expandéru č. 1. Z expandéru č. 1 vedeme již mokrou páru přes přehřívák, který ji ještě zvýší entalpii, na parní turbínu, kde generujeme špičkovou elektřinu z akumulace 2.

- Horkovodní kotel musí být v provozu



Obr. 12 Zjednodušené schéma režimu vybití (výroba špičkové elektrické energie)

Páru, která se uvolní v expandérech 1 a 2, vedeme přes přehřívák 2 do parní turbíny, kde vyrobíme elektřinu z akumulovaného kompresního tepla.

K dosažení ještě vyšší účinnosti výroby elektrické energie z akumulace přivedeme skrz předeřhřívák vzduchu stlačený vzduch z akumulátoru, který je umístěný v samostatném spalinovém tahu paralelně k teplosměnným plochám horkovodního kotle. Ohřevem

vzduchu odebereme část potřebného tepla ze spalin k ohřátí potřebného množství vody, ale tento deficit nahradí dodávka tepla v horké vodě ze separátorů 1 a 2 (akumulované kompresní teplo) a dodávka tepla 3 z tepla odpadního vzduchu v rekuperačním výměníku 1, umístěném za plynovou turbínou.

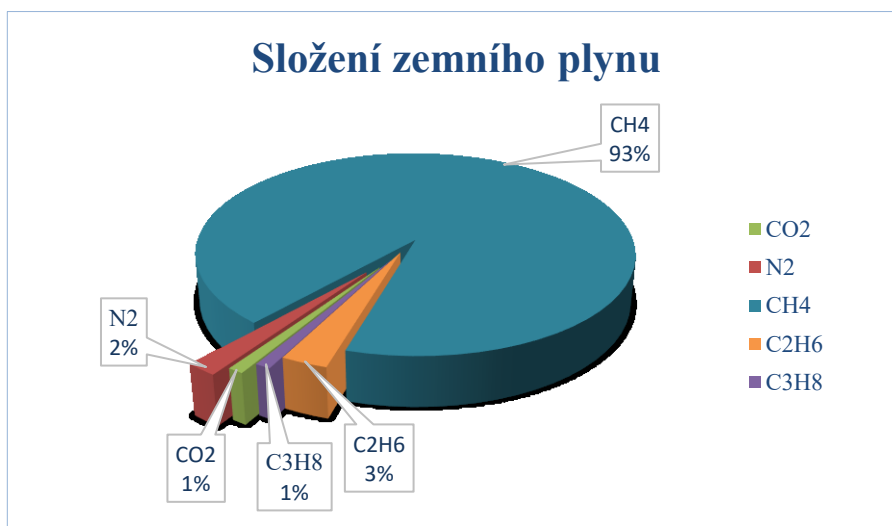
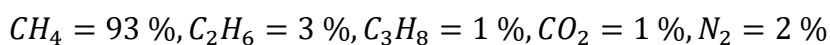
Tímto provozem jsme schopni dosáhnout výroby špičkové elektřiny z akumulace s účinností přes 80 % při stejné spotřebě množství paliva v horkovodním kotli HWB.

4. Stechiometrie

Důvod proč provádíme stechiometrické výpočty je zjištění objemu vzduchu potřebného pro spalování jednotkového množství paliva a objemu spalin, které vznikají při spalování. Vycházíme z chemických reakčních rovnic, které nyní nazýváme stechiometrickými spalovacími rovnicemi. Z hlediska průběhu spalování rozlišujeme dvě varianty:

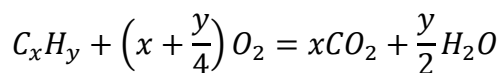
- Dokonalé spalování (stechiometrické) – teoretický model
- Nedokonalé spalování (vznik chemického nedopalu ve formě CO)

Zadané složení zemního plynu:



Graf 1 Složení zemního plynu

Spalovací rovnice:



Množství potřebného kyslíku pro dokonalé spálení 1 Nm³ plynu

$$V_{O_2}^t = 2 \cdot CH_4 + 3,5 \cdot C_2H_6 + 5 \cdot C_3H_8 \quad (4.1)$$

CH ₄	podíl methanu v palivu (viz zadání)	[-]
C ₂ H ₆	podíl ethanu v palivu (viz zadání)	[-]
C ₃ H ₈	podíl propanu v palivu (viz zadání)	[-]

$$V_{O_2}^t = 2 \cdot 0,93 + 3,5 \cdot 0,03 + 5 \cdot 0,01 = 2,015 \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

Množství vzduchu teoretického suchého pro dokonalé spálení 1 Nm³ plynu

$$V_{vz,t}^s = \frac{V_{O_2}^t}{0,21} \quad (4.2)$$

$$V_{O_2}^t \quad \text{množství potřebného kyslíku (4.1)} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

$$V_{vz,t}^s = \frac{2,015}{0,21} = \mathbf{9,595} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

Součinitel zvětšení objemu suchého vzduchu v důsledku vlhkosti

$$\chi_v = 1 + \frac{\phi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\phi}{100} \cdot p''} \quad (4.3)$$

ϕ	relativní vlhkost vzduchu (viz zadání)	[%]
p''	parciální tlak vodní páry na mezi sytosti pro danou teplotu vzduchu t_v (Tab. 2)	[MPa]
p_c	celkový tlak (viz zadání)	[MPa]
t_v	teplota spalovacího vzduchu na vstupu (zadání)	[°C]

$$\chi_v = 1 + \frac{60}{100} \cdot \frac{0,0035}{0,1 - \frac{60}{100} \cdot 0,0035} = \mathbf{1,021} \quad [-]$$

$t_v [^{\circ}C]$	0	10	20	30	40
$p'' [MPa]$	0,0006108	0,0012277	0,0042416	0,0042416	0,0073742

Tab. 2 Závislost parciálního tlaku vodní páry na teplotě vzduchu [1]

Množství vzduchu teoretického vlhkého

$$V_{vz,t}^v = V_{vz,t}^s \cdot \chi_v \quad (4.4)$$

$$V_{vz,t}^s \quad \text{Množství vzduchu teoretického suchého (4.2)} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

$$\chi_v \quad \text{Součinitel vlhkosti vzduchu (4.3)} \quad [-]$$

$$V_{vz,t}^v = 9,595 \cdot 1,021 = \mathbf{9,801} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

Objem vodní páry ve spalovacím vzduchu

$$V_{vz,H_2O}^v = V_{vz,t}^v - V_{vz,t}^s = (\chi_v - 1) \cdot V_{vz,t}^s \quad (4.5)$$

$$V_{vz,t}^s \quad \text{Množství vzduchu teoretického suchého (4.2)} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

$$V_{vz,t}^v \quad \text{Množství vzduchu teoretického vlhkého (4.4)} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

$$\chi_v \quad \text{Součinitel vlhkosti vzduchu (4.3)} \quad [-]$$

$$V_{vz,H_2O}^v = (1,021 - 1) \cdot 9,595 = \mathbf{0,206} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

Množství vzduchu skutečného suchého

$$V_{vz,s}^s = \alpha \cdot V_{vz,t}^s \quad (4.6)$$

$V_{vz,t}^s$	Množství vzduchu teoretického suchého (4.2)	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$
α	Přebytek vzduchu (viz zadání)	[-]

$$V_{vz,s}^s = 1,07 \cdot 9,595 = \mathbf{10,267} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$$

Množství vzduchu skutečného vlhkého

$$V_{vz,s}^v = \chi_v \cdot V_{vz,s}^s \quad (4.7)$$

$V_{vz,s}^s$	Množství vzduchu skutečného suchého (4.6)	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$
χ_v	Součinitel vlhkosti vzduchu (4.3)	[-]

$$V_{vz,s}^v = 1,021 \cdot 10,267 = \mathbf{10,487} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$$

Objem CO₂ ve spalínách

$$V_{CO_2} = CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8 + CO_2 \quad (4.8)$$

CH ₄	Podíl methanu v palivu (viz zadání)	[-]
C ₂ H ₆	Podíl ethanu v palivu (viz zadání)	[-]
C ₃ H ₈	Podíl propanu v palivu (viz zadání)	[-]
CO ₂	Podíl oxidu uhličitého v palivu (viz zadání)	[-]

$$V_{CO_2} = 0,93 + 2 \cdot 0,03 + 3 \cdot 0,01 + 0,01 = \mathbf{1,030} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$$

Objem N₂ ve spalínách

$$V_{N_2} = N_2 + 0,79 \cdot V_{vz,s}^s \quad (4.9)$$

$V_{vz,s}^s$	Množství vzduchu skutečného suchého (4.6)	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$
N_2	Podíl dusíku v palivu	[-]

$$V_{N_2} = 0,02 + 0,79 \cdot 10,267 = \mathbf{8,131} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$$

Objem H₂O ve spalínách

$$V_{H_2O} = 2 \cdot CH_4 + 3 \cdot C_2H_6 + 4 \cdot C_3H_8 + V_{vz,H_2O}^v \quad (4.10)$$

V_{vz,H_2O}^v	Množství vzduchu skutečného suchého (4.5)	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$
CH ₄	Podíl methanu v palivu	[-]
C ₂ H ₆	Podíl ethanu v palivu	[-]
C ₃ H ₈	Podíl propanu v palivu	[-]

$$V_{H_2O} = 2 \cdot 0,93 + 3 \cdot 0,03 + 4 \cdot 0,01 + 0,206$$

$$V_{H_2O} = \mathbf{2,196} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$$

Objem O₂ ve spalínách

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot V_{vz,t}^s \cdot (\alpha - 1) \quad (4.11)$$

$$V_{vz,t}^s \quad \text{Množství vzduchu teoretického suchého (4.2)} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

$$\alpha \quad \text{Přebytek vzduchu (viz zadání)} \quad [-]$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot 9,595 \cdot (1,07 - 1) = \mathbf{0,141} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

Množství vzniklých spalín teoretických suchých

$$V_{sp,t}^s = V_{CO_2} + V_{N_2} \quad (4.12)$$

$$V_{CO_2} \quad \text{Objem CO}_2 \text{ ve spalínách (4.8)} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

$$V_{N_2} \quad \text{Objem N}_2 \text{ ve spalínách (4.9)} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

$$V_{sp,t}^s = 1,030 + 8,131 = \mathbf{9,161} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

Množství vzniklých spalín skutečných suchých

$$V_{sp,s}^s = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \quad (4.13)$$

$$V_{CO_2} \quad \text{Objem CO}_2 \text{ ve spalínách (4.8)} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

$$V_{N_2} \quad \text{Objem N}_2 \text{ ve spalínách (4.9)} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

$$V_{O_2} \quad \text{Objem O}_2 \text{ ve spalínách (4.11)} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

$$V_{sp,s}^s = 1,03 + 8,131 + 0,141 = \mathbf{9,302} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

Množství vzniklých spalín skutečných vlhkých

$$V_{sp,s}^v = V_{sp,s}^s + V_{H_2O} \quad (4.14)$$

$$V_{sp,s}^s \quad \text{Množství spalín skutečných suchých (4.13)} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

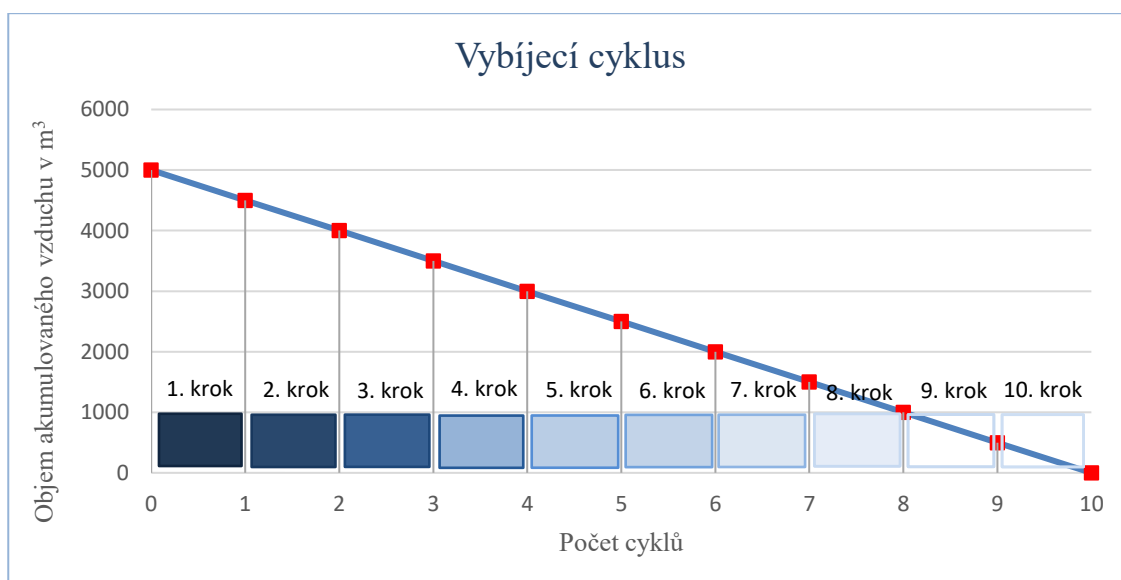
$$V_{H_2O} \quad \text{Objem H}_2\text{O} \text{ ve spalínách (4.10)} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

$$V_{sp,s}^v = 9,302 + 2,196 = \mathbf{11,498} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

5. Tepelný výpočet přehřevu vzduchu

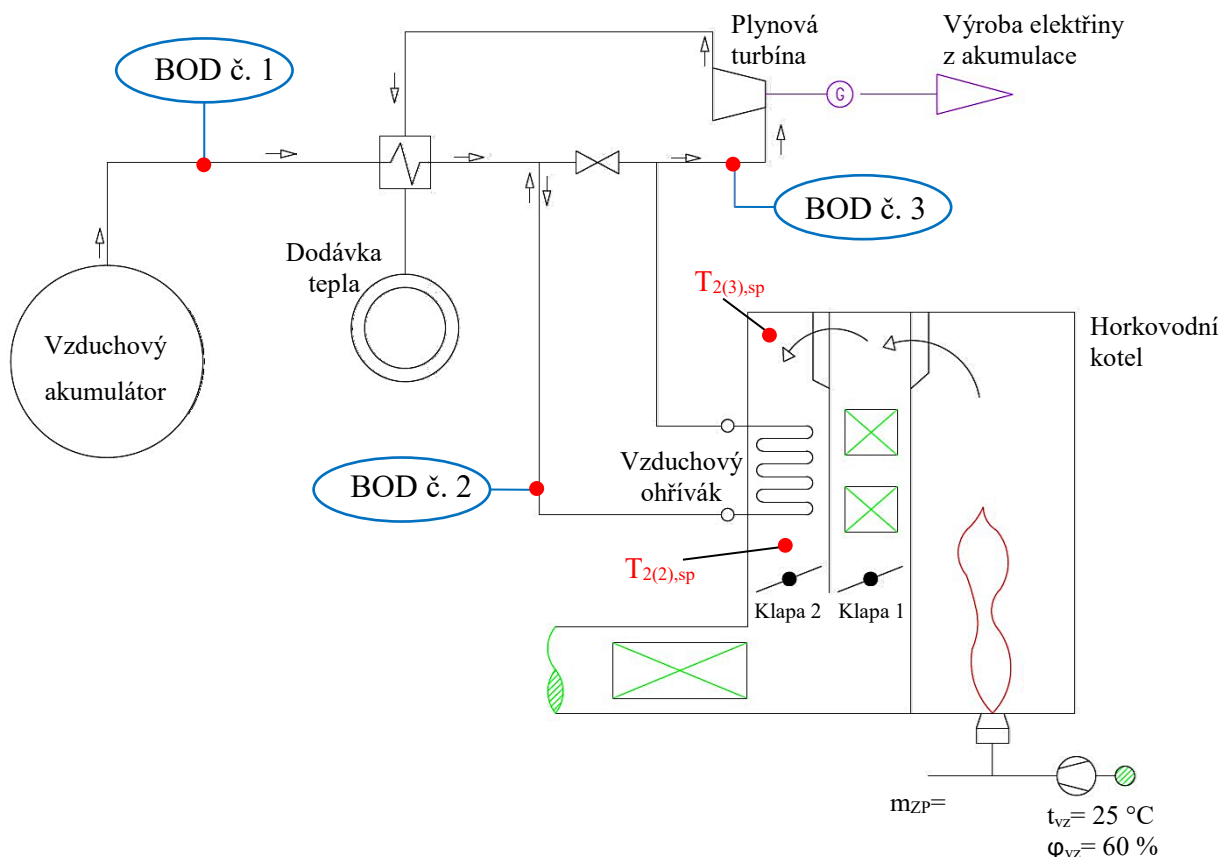
Výrobní teplo kotle, které také označujeme jako celkový tepelný výkon kotle, lze určit podle rovnice (5.9). V našem případě navrhujeme tepelný výkon kotle na předem zadané parametry (teploty a tlaku) vzduchu z akumulátoru tak, abychom dosáhli požadovaných vstupních hodnot na plynové turbíně a tím i požadovaného výkonu turbíny, potažmo elektrického generátoru.

Rozhodli jsme se, že proces „vybíjení“ akumulátoru bude trvat 1 hodinu. Vybíjecí proces jsme si tedy rozdělili na deset cyklů (1. krok – 10. krok). Pro názornost je počet kroků a jednotlivých cyklů uveden v následujícím grafu č. 2.



Graf 2 Vybíjecí cyklus vzduchového akumulátoru rozdělen do úseku 1 hodiny

Krok č. 1 bereme jako stav plně nabitého akumulátoru o $p = 37,84$ bar a $t = 125,2$ °C. Celkový objem vzduchového akumulátoru uvažujeme $V = 5\,000$ m³. Celkový výkon kotle je navrhnout tak, aby se vzniklými spaliny ohřál vzduch s parametry odpovídajícím v 1. kroku na požadovanou teplotu. Jednotlivé parametry v nejdůležitějších krocích jsou uvedeny v následující Tab. 3 na další straně, ke které se váže i Obr. 13, kde jsou parametry přiřazeny do přesných bodů.



Obr. 13 Schéma přiřazení jednotlivých bodů do systému

Hodnoty jednotlivých veličin v daných bodech 1, 2 a 3 nalezneme v tabulce níže, jsou brány vždy střední hodnoty daného kroku.

	BOD č. 1		BOD č. 2		BOD č. 3	
veličina	1. krok	10. krok	1. krok	10. krok	1. krok	10. krok
$\dot{m}_{vz,stř} [kg \cdot s^{-1}]$	82,48	1,53	82,48	1,53	82,48	1,53
$t_{vz,stř} [^{\circ}C]$	125,2	73,8	171,2	512	600	600
$p_{vz,stř} [bar]$	37,84	3,26	37,48	3,26	37,48	3,26

Tab. 3 Přehled základních parametrů během procesu vybíjení

Z důvodu využití tohoto principu akumulace na různých energetických centrálách o různých výkonech a teplot spalin, ve výpočtu uvažujeme se třemi variantami teplot spalin na vstupu k ohřívák vzduchu. A to 1 100 °C, 1 000 °C a 900 °C. Následné výpočty jsou prováděny vždy pro hodnoty v 1. kroku vybíjení.

5.1 Výpočet množství paliva

Potřebné teplo pro ohřátí vzduchu

$$Q_{vz} = \dot{m}_{vz} \cdot c_{vz} \cdot (T_{1(3),vz} - T_{1(2),vz}) \quad (5.1)$$

\dot{m}_{vz}	Hmotnostní průtok vzduchu (Tab. 3)	[kg · s ⁻¹]
c_{vz}	Měrná tepelná kapacita vzduchu pro $t_{vz, střední} = \frac{171,2 + 600}{2} = 385,6 \text{ °C}$ (Příloha č. 1)	[kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
$T_{1(3),vz}$	Teplota vzduchu na vstupu (Tab. 3)	[°C]
$T_{1(2),vz}$	Teplota vzduchu výstupu (Tab. 3)	[°C]

$$Q_{vz} = 82,48 \cdot 1,074 \cdot (600 - 171,2) = \mathbf{37,985} \quad [\text{MW}]$$

	VARIANTA A	VARIANTA B	VARIANTA C
Teplota spalin - vstup $T_{2(3),sp}$ [°C]	1 100	1 000	900
Teplota spalin - výstup $T_{2(2),sp}$ [°C]	550	550	550

Tab. 4 Tabulka teplot spalin pro varianty A, B a C

Po konzultaci s vedoucím diplomové práce již při dalších výpočtech počítáme vždy s teplotou spalin pro Variantu A.

Potřebné množství spalin

$$Q_{sp} = Q_{vz} = \dot{m}_{sp} \cdot c_{sp} \cdot (T_{2(3),sp} - T_{2(2),sp}) \rightarrow \dot{m}_{sp} \quad (5.2)$$

$$\dot{m}_{sp} = \frac{Q_{sp}}{c_{sp} \cdot (T_{2(3),sp} - T_{2(2),sp})}$$

Q_{sp}	Množství spalin skutečných suchých (5.1)	[kW]
c_{sp}	Měrná tepelná kapacita spalin, střední (tab. 7)	[kJ · m ⁻³ · K ⁻¹]
$T_{2(3),sp}$	Teplota spalin na výstupu (Tab. 4)	[°C]
$T_{2(2),sp}$	Teplota spalin na vstupu (Tab. 4)	[°C]

$$\dot{m}_{sp} = \frac{37\,984,6}{1,644 \cdot (1\,100 - 550)} = \mathbf{42,009} \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{s}^{-1}]$$

	VARIANTA A	VARIANTA B	VARIANTA C
$\dot{m}_{sp} [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{s}^{-1}]$	42,009	51,817	67,325

Tab. 5 Potřebné množství spalin

Měrná tepelná kapacita spalín

Výpočet byl proveden na základě VÚCHU, a.s. Brno. V rovnici 5.3 je index i zastoupen koeficienty jednotlivých plynů ve spalínách uvedených v tabulce níže.

	A	B	C	D	E
CO ₂	31,95	$3,570 \cdot 10^{-2}$	$-1,529 \cdot 10^{-5}$	$2,312 \cdot 10^{-9}$	$-3,758 \cdot 10^{-5}$
O ₂	24,33	$1,661 \cdot 10^{-2}$	$-7,446 \cdot 10^{-6}$	$1,246 \cdot 10^{-9}$	$6,777 \cdot 10^{-6}$
N ₂	23,63	$1,254 \cdot 10^{-2}$	$-4,136 \cdot 10^{-6}$	$4,801 \cdot 10^{-10}$	$1,724 \cdot 10^{-5}$
H ₂ O	25,36	$1,933 \cdot 10^{-2}$	$-3,798 \cdot 10^{-6}$	$1,751 \cdot 10^{-10}$	$2,538 \cdot 10^{-5}$

Tab. 6 Koeficienty pro výpočet c_p

Měrná tepelná kapacita

$$c_{pi} = \frac{A_i + B_i \cdot T_{stř} + C_i \cdot T^2 + D_i \cdot T^3 + \frac{E_i}{T^2}}{22,4} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5.3)$$

T, t Teplota spalín $[\text{K}, ^\circ\text{C}]$

	y_i [1]	c_{pi} [$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$]	c_p [$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$]
CO ₂	0,090	2,490	1,646
O ₂	0,012	1,573	
N ₂	0,707	1,476	
H ₂ O	0,191	1,886	

Tab. 7 Výpočet měrné tepelné kapacity spalín pro $t_{stř,sp} = 825 ^\circ\text{C}$

Měrná tepelná kapacita směsi

$$c_{p(směs)} = \sum c_{pi} \cdot y_i \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Potřebné množství paliva

$$1,1 \cdot \dot{m}_{sp} = \dot{m}_{pal} \cdot (V_{sp,s}^v + (\alpha - 1) \cdot V_{vz,s}^v) \rightarrow \dot{m}_{pal} \quad (5.4)$$

$$\dot{m}_{pal} = \frac{1,1 \cdot \dot{m}_{sp}}{(V_{sp,s}^v + (\alpha - 1) \cdot V_{vz,s}^v)}$$

\dot{m}_{pal}	Potřebné množství paliva (5.4)	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{s}^{-1}]$
\dot{m}_{sp}	Potřebné množství spalín (5.2)	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{s}^{-1}]$
α	Přebytek vzduchu (viz zadání)	[-]
$V_{sp,s}^v$	Množství vzniklých spalín skutečných vlhkých (4.14)	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$
$V_{vz,s}^v$	Množství vzduchu vlhkého skutečného (4.7)	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$

$$\dot{m}_{pal} = \frac{1,1 \cdot 42,009}{(11,498 + (1,07 - 1) \cdot 10,487)} = \mathbf{2,10} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Množství spalin (m_{sp}) násobíme hodnotou 1.1, protože uvažujeme s 10% netěsností Klapy 1 v prvním tahu kotle při jejím plném uzavření. Klapa 2 bude redundantní (zdvojená), aby v době, kdy ohřívák nebude v provozu, neunikalo potřebné teplo a hlavně se teplotně nenamáhal nechlazený ohřívák vzduchu.

	VARIANTA A	VARIANTA B	VARIANTA C
$\dot{m}_{pal} [m_N^3 \cdot s^{-1}]$	2,10	2,59	3,37

Tab. 8 Potřebné množství paliva

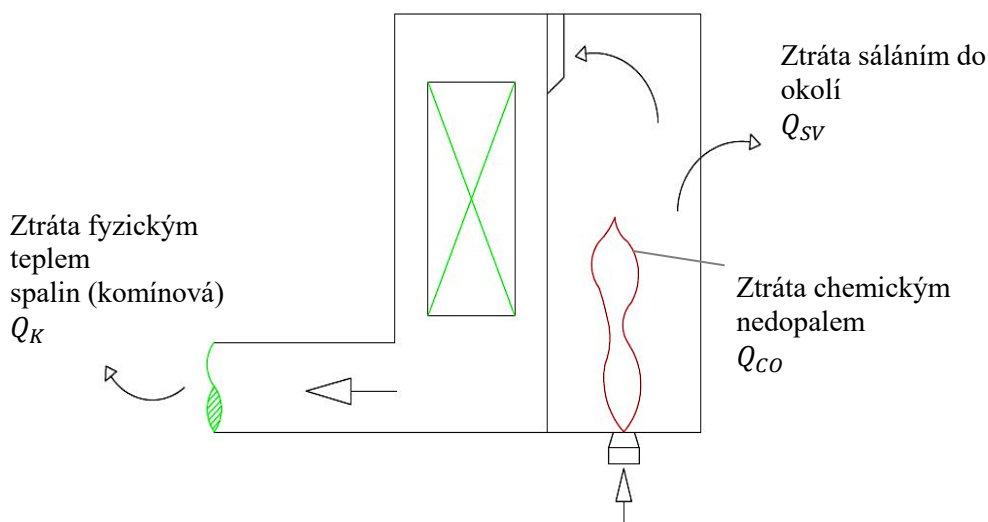
5.2 Výrobní teplo kotle

Bilance přivedeného a vyrobeného tepla

$$Q_{přivedené} = Q_{výr} + Q_{CO} + Q_{SV} + Q_K \quad (5.5)$$

$Q_{přiv}$	(Výhřevnost · m_{pal})	[kW]
$Q_{výr}$	Výrobní teplo kotle	[kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
Q_{CO}	Ztráta tepla chemickým nedopalem (5.6)	[kW]
Q_{SV}	Ztráta sdílením tepla do okolí (5.7)	[kW]
Q_K	Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová), (5.8)	[kW]

Na základě této bilance si vyjádříme $Q_{výr}$ a zjistíme výrobní teplo kotle. Tedy teplo přivedené mínus energie vystupující z kotle ve formě tepelných ztrát. Nejprve je ale zapotřebí zjistit tepelné ztráty kotle, které jsou pro názornost zobrazeny na obrázku níže.



Obr. 14 Schéma tepelných ztrát kotle

Ztráta tepla chemickým nedopalem

$$Q_{CO} = Q_{přivedené} \cdot \xi_{CO} \quad (5.6)$$

$Q_{přiv}$	(Výhřevnost · m _{pal})	[kW]
ξ_{CO}	Ztráta chemickým nedopalem (6.1)	[-]

$$Q_{CO} = (33\,480 \cdot 2,1) \cdot 0,00032 = \mathbf{22,64} \quad [\text{kW}]$$

Ztráta sdílením tepla do okolí

$$Q_{SV} = Q_{přivedené} \cdot \xi_{SV} \quad (5.7)$$

$Q_{přiv}$	(Výhřevnost · m _{pal})	[kW]
ξ_{SV}	Ztráta sdílením tepla do okolí (6.2)	[-]

$$Q_{SV} = (33\,480 \cdot 2,1) \cdot 0,0033 = \mathbf{232,33} \quad [\text{kW}]$$

Ztráta sdílením tepla do okolí

$$Q_K = Q_{přivedené} \cdot \xi_K \quad (5.8)$$

$Q_{přiv}$	(Výhřevnost · m _{pal})	[kW]
ξ_K	Ztráta fyzickým teplem spalin (6.3)	[-]

$$Q_K = (33\,480 \cdot 2,1) \cdot 0,035 = \mathbf{2\,461,66} \quad [\text{kW}]$$

Výrobní teplo kotle

$$Q_{výr} = Q_{přivedené} - Q_{CO} - Q_{SV} - Q_K \quad (5.9)$$

$Q_{přiv}$	(Výhřevnost · m _{pal})	[kW]
Q_{CO}	Ztráta tepla chemickým nedopalem (5.6)	[kW]
Q_{SV}	Ztráta sdílením tepla do okolí (5.7)	[kW]
Q_K	Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová), (5.8)	[kW]

$$Q_{výr} = (33\,480 \cdot 2,1) - 22,64 - 232,33 - 2\,461,66$$

$$Q_{výr} = \mathbf{67\,655,1} \quad [\text{kW}]$$

Nyní na základě zjištění výrobního tepla kotle můžeme vypočítat množství teplé vody, které bude kotel schopen ohřát na námi požadovanou teplotu a zajišťovat dodávku tepla. Současný výpočet uvažujeme stále pro variantu, kdy veškeré vzniklé teplo předáme vodě (klasický horkovodní kotel bez akumulace).

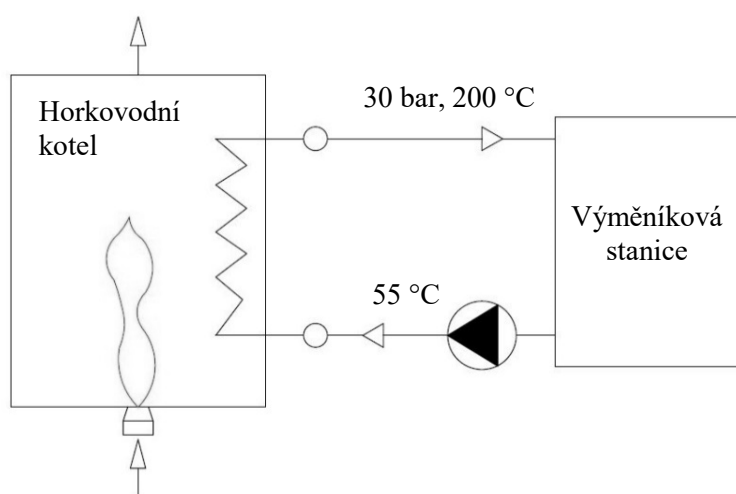
Hmotnostní průtok ohřívané vody

$$Q_{výr} = \dot{m}_{H_2O} \cdot (i_{200} - i_{55}) \Rightarrow \dot{m}_{H_2O} \quad (5.10)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{Q_{výr}}{(i_{200} - i_{55})}$$

$Q_{výr}$	Výrobní teplo kotle (5.9)	[kW]
\dot{m}_{H_2O}	Průtok ohřívané vody	[kg · s ⁻¹]
i_{200}	Entalpie vody při t = 200 °C (Příloha č. 1)	[kJ · kg ⁻¹]
i_{55}	Entalpie vody při t = 55 °C (Příloha č. 1)	[kJ · kg ⁻¹]

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{67\,655,1}{(2\,865 - 203,5)} = 25,68 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$



Obr. 15 Schéma kotle a výměňkové stanice

Teplotu vody na vstupu a výstupu z výměňkové stanice volím na základě doporučení vedoucího diplomové práce.

6. Tepelné ztráty kotle

Při spalování plyných paliv uvažujeme obvykle se třemi základními tepelnými ztrátami kotle:

- Ztráta chemickým nedopalem ξ_{CO}
- Ztráta sáláním a vedením do okolí ξ_{SV}
- Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová) ξ_{SV}

6.1 Ztráta chemickým nedopalem

Ztráta chemickým nedopalem, jinak také nazývána ztráta hořlavinou ve spalinách, vyjadřuje teplo ztracené v důsledku přítomnosti nespálených plynů ve spalinách. Při návrhu nových zařízení lze její velikost zanedbat nebo její maximální velikost vypočítat z emisního limitu podle vztahu z rovnice (6.1):

Ztráta chemickým nedopalem

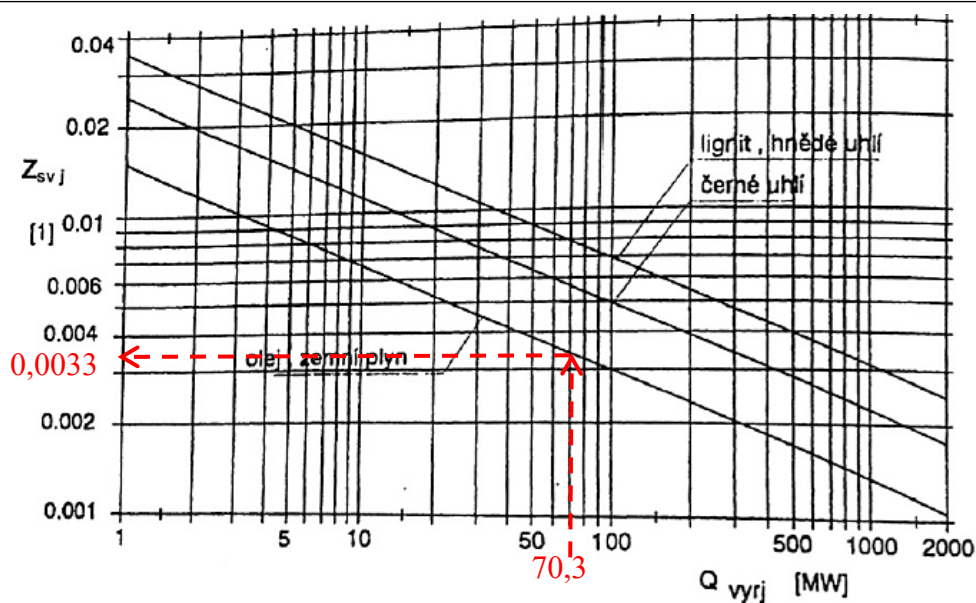
$$\xi_{CO} = \frac{0,2116 \cdot mg_{CO} \cdot V_{sp,t}^S}{(21 - O_{2ref}) \cdot Q_i} \quad (6.1)$$

$V_{sp,t}^S$	Množství spalin skutečných vlhkých (4.12)	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
mg_{CO}	Specifický emisní limit (vyhláška 415/2012 Sb.)	$[m^3_N \cdot hod^{-1}]$
O_{2ref}	Obsah kyslíku pro referenční stav (viz zadání)	$[\%]$
Q_i	Výhřevnost paliva (viz zadání)	$[kJ \cdot kg^{-1}]$

$$\xi_{CO} = \frac{0,2116 \cdot 100 \cdot 9,161}{(21 - 3) \cdot 33480} = 3,217 \cdot 10^{-4} [-] \quad tj. \quad \xi_{CO} = 3,217 \cdot 10^{-2} [\%]$$

6.2 Ztráta sáláním a vedením do okolí

Tato ztráta představuje množství tepla, které uniká skrze plášť kotle do okolí. Zde záleží na kvalitě izolace stěn, způsobu oplechování, velikosti a výkonu kotle. Určení této ztráty není rozhodujícím faktorem v konečném vyčíslení, bereme tedy hodnotu odečtením z grafu na základě námi zjištěného tepelného výkonu kotle.



Obr. 16 Ztráta sdílením tepla do okolí [1]

Ztráta sdílením do okolí

$$\xi_{SV} = 0,0033 [-] \quad tj. \quad \xi_{SV} = 0,33 [\%] \quad (6.2)$$

6.3 Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová)

Ztráta komínová představuje největší ztrátu ze všech zmiňovaných. Jedná se o teplo odcházející z kotle v kouřových plynech. Nejvýrazněji ovlivňuje výslednou účinnost kotle. Velikost této ztráty závisí na teplotě spalin a přebytku vzduchu ve spalinách za kotlem. Postup výpočtu volíme podle [1].

Ztráta citelným teplem spalin (komínová)

$$\xi_K = V_{sp,s}^u \cdot c_{p,sp,stř} \cdot \left(\frac{t_{kotel} - t_{vztažná}}{Q_i^r} \right) \quad (6.3)$$

$V_{sp,s}^u$	Objem vlhkých spalin skutečných (4.14)	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$c_{p,sp,stř}$	Střední měrná tepelná kapacita spalin (6.4)	$[kJ \cdot m^{-3}_N \cdot K^{-1}]$
t_{kotel}	Výstupní teplota z kotle (viz zadání)	$[^{\circ}C]$
$t_{vztažná}$	Teplota vztažná (viz zadání)	$[^{\circ}C]$

$$\xi_K = 11,498 \cdot 1,36 \cdot \frac{100-25}{33480} = 0,035 [-] \quad tj. \quad \xi_K = 3,5 [\%]$$

Střední měrná tepelná kapacita spalin pro výpočet komínové ztráty

$$c_{p,sp, stř} = \frac{c_{p,kotel} \cdot t_{kotel} - c_{p,vztažná} \cdot t_{vztažná}}{t_{kotel} - t_{vztažná}} \quad (6.4)$$

$c_{p,kotel}$	Měrná entalpie spalin za kotlem (dle VÚCHz)	$[kJ \cdot m^{-3}_N \cdot K^{-1}]$
t_{kotel}	Teplota spalin na výstupu z kotle (viz zadání)	$[^{\circ}C]$
$c_{p,vztažná}$	Měrná kapacita spalin při vztažné teplotě (VÚCH)	$[kJ \cdot m^{-3}_N \cdot K^{-1}]$
$t_{vztažná}$	Vztažná teplota (viz zadání)	$[^{\circ}C]$

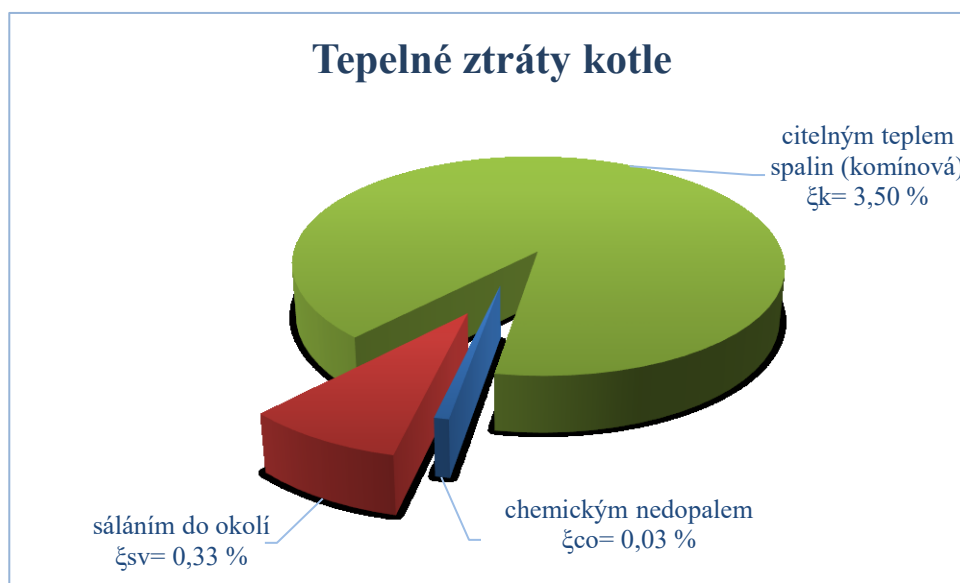
$$c_{p,sp, stř} = \frac{1,34 \cdot 100 - 1,29 \cdot 25}{100 - 25} = 1,36 \quad [kJ \cdot m^{-3}_N \cdot K^{-1}]$$

6.4 Celkové tepelné ztráty kotle

$$\xi_{kotel, cel} = \xi_{CO} + \xi_{SV} + \xi_K \quad (6.5)$$

ξ_{CO}	Ztráta chemickým nedopalem (6.1)	$[-]$
ξ_{SV}	Ztráta sdílením do okolí (6.2)	$[-]$
ξ_K	Ztráta fyzickým teplem spalin – komínová (6.3)	$[-]$

$$\xi_{kotel, cel} = 0,00032 + 0,0033 + 0,035 = 0,0386 \quad [-] \quad tj. \quad \xi_{kotel, cel} = 3,86 \quad [\%]$$



Graf 3 Tepelné ztráty kotle [%]

7. Účinnost kotle

Stanovení účinnosti nepřímým způsobem na základě zjištění tepelných ztrát kotle z předešlé kapitoly 6.

Ztráta chemickým nedopalem

$$\eta_k = 1 - \xi_{kotel, cel} \quad (7.1)$$

$\xi_{kotel, cel}$ Celkové tepelné ztráty kotle (6.5) [-]

$$\eta_k = 1 - 0,0386 = \mathbf{0,9614} [-] \quad tj. \quad \eta_k = \mathbf{96,14} [\%]$$

8. Výpočtový projekt přehřevu vzduchu

I když cílem této práce není vlastní návrh horkovodního kotle, pro zpracování konstrukčního projektu a samotný návrh přehříváku vzduchu, je nezbytné znát alespoň základní parametry a přibližné rozměry daného horkovodního kotle, ve kterém bude přehřev vzduchu probíhat. Pro naše účely počítáme v následujících rovnicích vždy se středními hodnotami teplot a tlaku.

8.1 Návrh spalovací komory

Proto provedeme základní výpočet objemu spalovací komory. Tu navrhujeme podle doporučeného objemového zatížení dle [1].

Návrh hořáků

Nabízí se provedení hořáků instalovaných na stropu kotle:

- čelními hořáky pod stropem
- stropní hořáky

Při variantě s čelními hořáky pod stropem sice dosáhneme lepší regulace a zatížení průřezu spaliny dle hustšího počtu hořáků, ale s tím se váže i navýšení počtu klapky, přírodních kanálů, celková správa a cena. Proto volíme klasické stropní hořáky i na úkor nevýhody horšího zaplnění spalovací komory při spalování o minimálním výkonu.

U kotlů velkých výkonů je základním faktorem pro volbu rozměrů spalovací komory průřezové zatížení ohniště definované vztahem (8.1).

$$q_s = \frac{\dot{m}_{pal} \cdot Q_i^r}{S_0} \quad [\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (8.1)$$

\dot{m}_{pal}	Množství přivedeného paliva (5.4)	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
Q_i^r	Výhřevnost paliva (viz zadání)	$[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}_N]$
S_0	Průřez spalovací komory	$[\text{m}^2]$

Doporučená hodnota průřezového zatížení dle [1] při spalování plynu je $q_s = 2,9$ až $3,5 [\text{MW} \cdot \text{m}^{-2}]$ pro jednu řadu hořáku. V našem případě bereme v úvahu 2 řady hořáků vždy

po dvou kusech. Výsledné průřezové tepelné zatížení ohniště $q_s = 2 \cdot 3 = 6 \text{ [MW} \cdot \text{m}^{-2}]$.

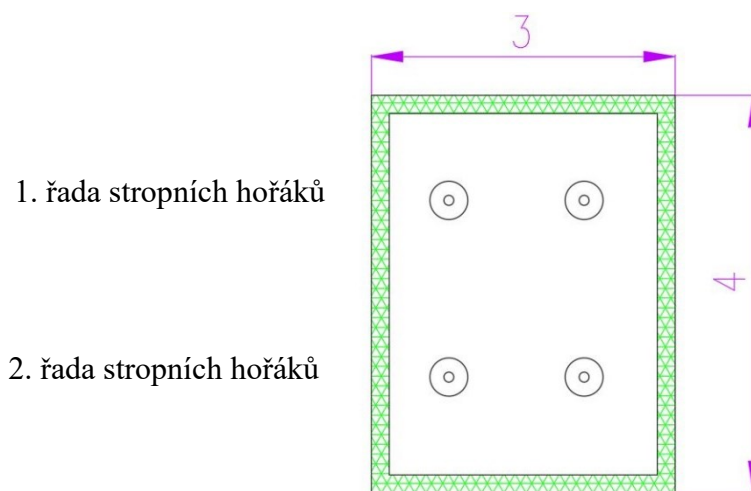
Následně si vyjádříme potřebnou plochu S_0 .

Průřez spalovací komory

$$S_0 = \frac{\dot{m}_{pal} \cdot Q_i^r}{q_s} \quad [\text{m}^2]$$

$$S_0 = \frac{2,1 \cdot 33,48}{6} = 11,7 \doteq 12 \quad [\text{m}^2]$$

Výsledná velikost půdorysu spalovací komory je 3 x 4 m.



Obr. 17 Půdorys spalovací komory

Pro ideální zaplnění objemu ohniště plamenem a pro námi navrženou koncepci jsou použity 4 stropní hořáky ve dvou řadách. Vždy dva hořáky v jedné řadě. Tím je zajištěna i případná regulace výkonu. Stěny spalovací komory jsou tvořeny membránovými stěnami plnící funkci ohříváku vody, jsou celé obaleny tepelnou izolací a na závěr patřičným oplechováním. Jako materiál tepelné izolace je navržen Sibal o tloušťce 200 mm.

Výkon hořáků kotle

$$P_{hoř} = Q_i^r \cdot \dot{m}_{pal} \quad (8.2)$$

Q_i^r Výhřevnost paliva (viz zadání) $[\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$

\dot{m}_{pal} Množství přivedeného paliva (5.4) $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$

$$P_{hoř} = 33,48 \cdot 2,1 = 70,3 \quad [\text{MW}]$$

Objem spalovací komory

$$q_v = \frac{P_{hoř}}{V_0} \quad (8.3)$$

q_v Objemové tepelné zatížení ohniště – volím [1] [kW · m⁻³]
 $P_{hoř}$ Výkon hořáku (8.2) [kW]

$$V_0 = \frac{P_{hoř}}{q_v} = \frac{70\,300}{600} = \mathbf{117,2} \quad [\text{m}^3]$$

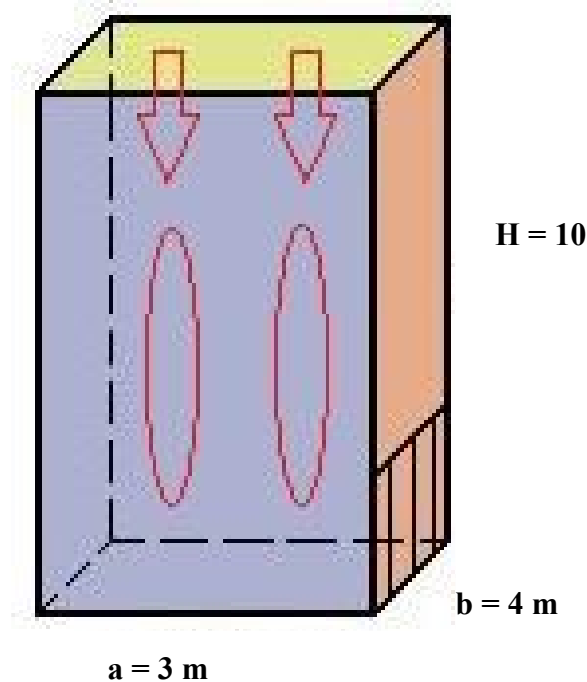
Výška spalovací komory

$$H = \frac{V_0}{a \cdot b} \quad (8.4)$$

V_0 Objem spalovací komory (8.3) [m³]
 a, b Rozměry spalovací komor [m]

$$H = \frac{117,2}{2 \cdot 3} = 9,76 \quad \dot{=} \mathbf{10} \quad [\text{m}]$$

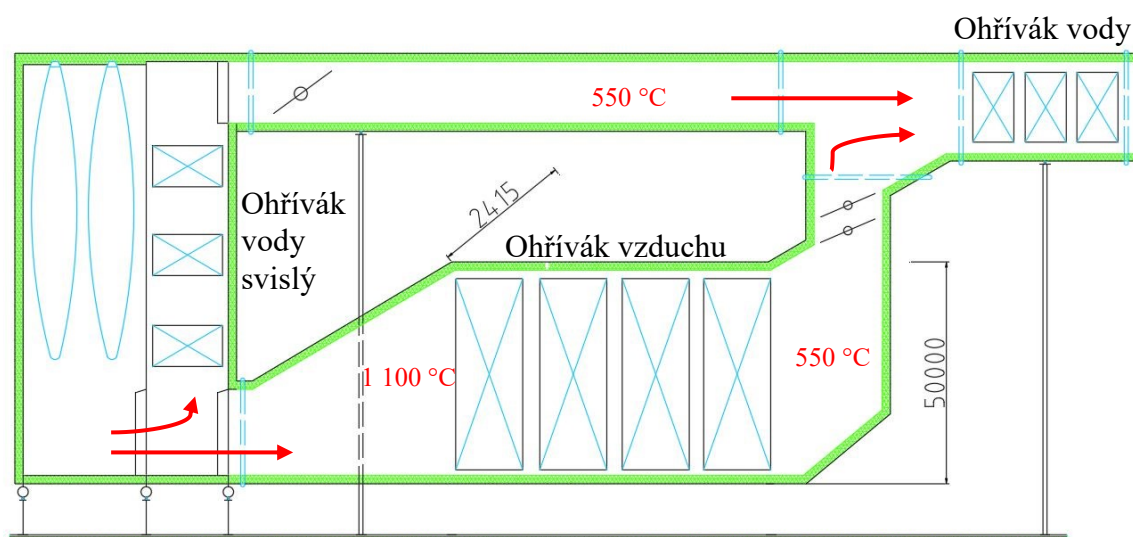
Finální podoba základních rozměrů spalovací komory



Obr. 18 Základní rozměry spalovací komory

8.2 Návrh ohříváku vzduchu

Po konzultaci s vedoucím diplomové práce jsem zvolil koncepci kotle uvedenou na Obr. 19. Spalovací komora má stropní hořáky a hlavní část plochy ohřevu vody je ve svislém tahu. Ohřívák vzduchu je situovaný ve vodorovném kanálu ve spodní části kotle. Zbývající ohřívák vody je ve vodorovném spalínovém kanálu až po smísení spalín z ohříváku vzduchu a spalín z hlavní plochy ohříváku vody. Spalovací komora a svislý spalínový tah tvoří jedno těleso z chlazených membránových stěn (MeS), zejména jako ohřev vody. Ohřívák vzduchu a poslední část ohříváku vody jsou umístěny v nechlazeném kanálu.

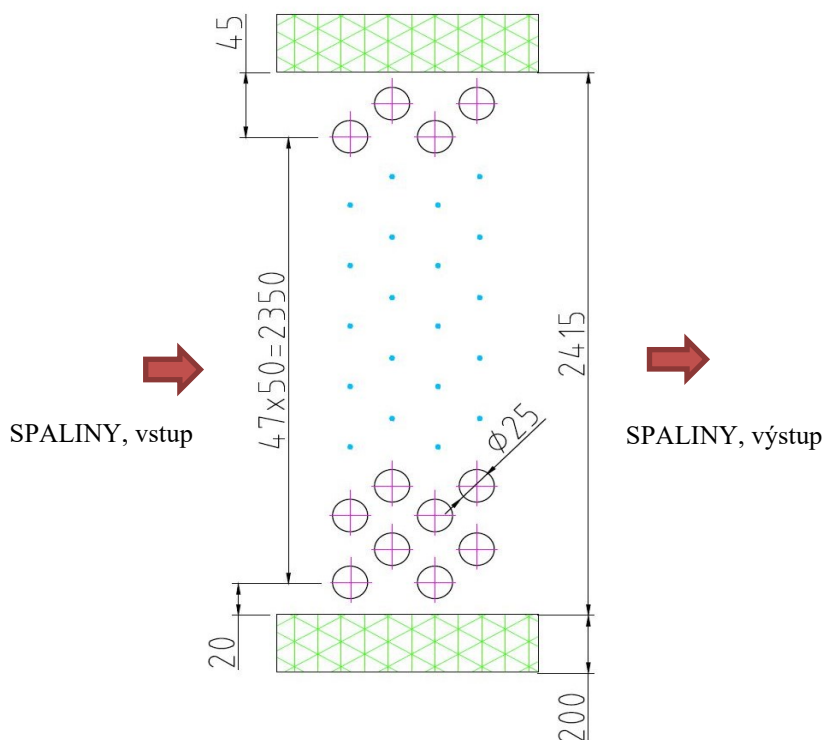


Obr. 19 Náčrt uvažované koncepce kotle

Jak již bylo zmíněno dříve, navrhovaný ohřívák vzduchu bude vsazen do druhého tahu horkovodního kotle. Stěny vodorovného tahu kotle nejsou chlazené a jsou izolovány tepelnou izolací Sibrál o tloušťce 200 mm zevnitř. Zvenčí je kanál oplechován. Teplosměnná plocha je provedena jako hustý trubkový svazek a je zapojena jako protiproudý výměník, přes který napříč proudí spaliny. Trubky jsou hladké, uspořádány vystřídaně a voleny jsou v souladu s normalizovanými rozměry trubek dle [17].

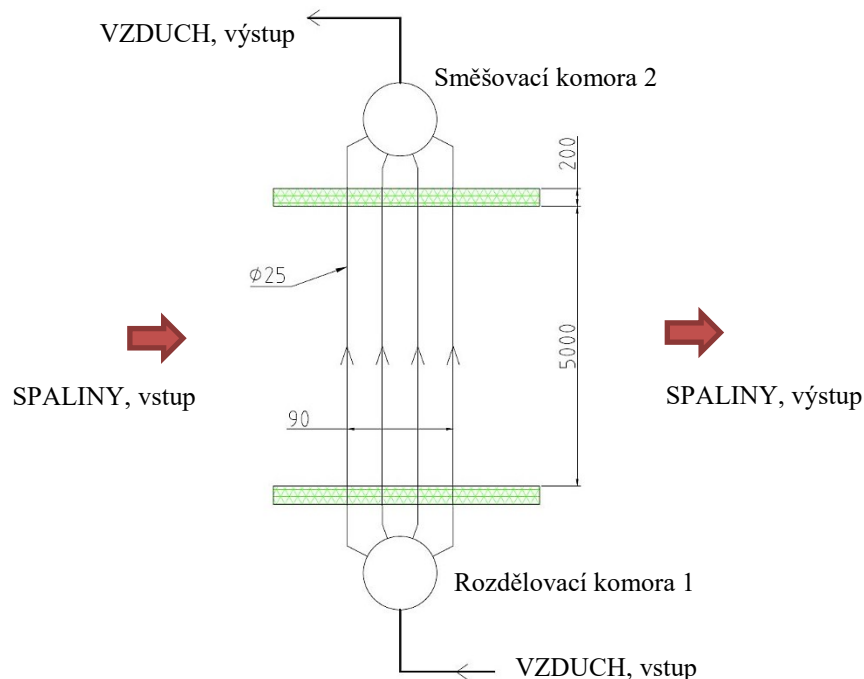
Celý výměník se bude skládat z několika dílů, každý bude sestávat ze tří paralelně zapojených svazků. Dle výsledné požadované plochy bude počet těchto dílů rozdělen po délce kanálu.

Podle doporučených rychlostí vzduchu bude jeden svazek obsahovat **4 řady** trubek po **48 kusech** trubek v jedné řadě. Průměr trubek vnější stěny je volen $D = 25$ mm. Příčná rozteč mezi trubkami $s_1 = 50$ [mm], podélná $s_2 = 30$ [mm].



Obr. 20 Schéma uspořádání jednoho svazku ohříváku (půdorys)

Z Obr. 20 je zřejmé, že spaliny proudí napříč svazkem trubek, ve kterém proudí náš akumulovaný vzduch. Díky spalování zemního plynu při výpočtech zanedbáváme součinitel zanesení (čisté spaliny) a součinitel tepelné efektivity volíme dle [1]. Výška kanálu (trubek) volíme $A = 5\,000$ [mm]. Na dalším obrázku je pro představu uveden náčrt jednoho svazku. Z hlavního potrubí je přiváděn vzduch do **rozdělovací komory 1**, kde se postupně rozděluje do čtyř řad trubek. Ty jsou po výstupu z kanálu zavedeny do **směšovací komory 2** a tři takové paralelní svazky tvoří jeden díl ohříváku vzduchu (viz Obr. 25).



Obr. 21 Schéma jednoho svazku ohříváku (bokorys)

Rozměry ohříváku vzduchu	Vnější průměr trubky	D_{ov}	25	[mm]
	Vnitřní průměr trubky	d_{ov}	21	[mm]
	Rozteč – příčná	S_1	50	[mm]
	Rozteč – podélná	S_2	30	[mm]
	Počet příčných řad	z_1	48	[-]
	Počet podélných řad	z_2	4	[-]
	Výška	A	5 000	[mm]
	Šířka kanálu	B	2 415	[mm]
Vlastnosti spalin	Teplota spalin na vstupu	$t_{2(2),sp}$	1 100	[°C]
	Teplota spalin na výstupu	$t_{2(3),sp}$	550	[°C]
	Střední teplota spalin	$t_{stř,sp}$	825	[°C]
	Tlak v ohništi	p	103 000	[Pa]
	Parciální tlak tříatomových plynů	p_s	0,029	[MPa]
	Objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách	r_s	0,282	[-]
	Objemový podíl H ₂ O ve spalinách	r_{H_2O}	0,192	[-]
Vlastnosti vzduchu	Teplota vzduchu na vstupu	$t_{1(2),vz}$	171,2	[°C]
	Teplota vzduchu na výstupu	$t_{1(3),vz}$	600	[°C]
	Střední teplota vzduchu	$t_{stř,vz}$	385,6	[°C]
	Tlak na začátku cyklu vybíjení	$p_{1(2)}$	3 784 000	[Pa]
	Objemový průtok pro $t_{stř,vz}$	\dot{V}^{vz}	4,18	[m ³ · s ⁻¹]

Tab. 9 Parametry ohříváku vzduchu

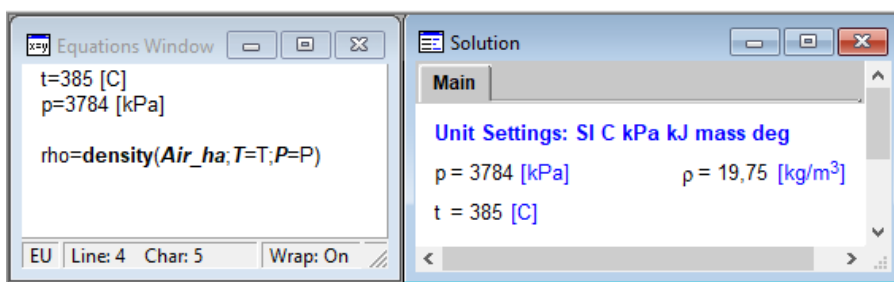
8.2.1 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu (podélné)

Objemový průtok ohřívajícího vzduchu v 1. kroku

$$\dot{V}_{vz} = \frac{\dot{m}_{vz}}{\rho} \quad (8.5)$$

\dot{m}_{vz}	Hmotnostní průtok vzduchu (Tab. 3)	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
ρ	Hustota vzduchu při daném tlaku a teplotě	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

$$\dot{V}_{vz} = \frac{82,48}{19,75} = 4,18 \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$



Obr. 22 Hustota vzduchu při dané teplotě a tlaku

Potřebná plocha průřezu pro vzduch

$$S_{vz} = \frac{\dot{V}_{vz}}{w_{vz}} \quad (8.6)$$

\dot{V}_{vz}	Objemový průtok vzduchu (8.5)	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
w_{vz}	Rychlost vzduchu v trubce (volím 20 m/s)	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

$$S_{vz} = \frac{4,18}{20} = 0,209 \quad [\text{m}^2]$$

Průřez pro vzduch 1 trubky

$$f_{vz} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (8.7)$$

d	Vnitřní průměr trubky (Tab. 9)	$[\text{m}]$
-----	--------------------------------	--------------

$$f_{vz} = \frac{\pi \cdot 0,021^2}{4} = 0,00035 \quad [\text{m}^2]$$

Potřebný počet paralelních trubek v jednom dílu ohříváku

$$n = \frac{S_{vz}}{f_{vz}} \quad (8.8)$$

S_{vz}	Potřebná plocha (8.6)	$[\text{m}^2]$
f_{vz}	Průtočný průřez pro vzduch (8.7)	$[\text{m}^2]$

$$n = \frac{0,209}{0,00035} = 603 \quad [-]$$

Počet svazků v jednom dílu (ve svazku 4 řady po 48 trubkách, tj. 192 trubek)
volím 3. Celkový počet paralelních trubek v jednom dílu:

$$n = 3 \cdot 192 = 576 [-]$$

Výsledný počet trubek vyhovuje dle rovnice 8.8.

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu (podélné obtékání)

$$\alpha_{vz} = 0,023 \cdot C_t \cdot C_l \cdot C_m \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (8.9)$$

C_t	Opravný koeficient, volím dle [1]	[-]
C_l	Opravný koeficient, volím dle [1]	[-]
C_m	Opravný koeficient, volím dle [1]	[-]
λ	Součinitel tepelné vodivosti (Příloha č. 1)	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
d	Vnitřní průměr trubky (Tab. 9)	[m]
Re	Reynoldsovo číslo (8.10)	[-]
Pr	Prandtlovo číslo (Příloha č. 1)	[-]

$$\alpha_{vz} = 0,023 \cdot 0,98 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{0,04992}{0,021} \cdot 250746^{0,8} \cdot 0,7115^{0,4}$$

$$\alpha_{vz} = 975,59 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{\omega \cdot d}{\nu} \quad (8.10)$$

ω	Rychlost vzduchu (volím 20 m/s)	[m · s ⁻¹]
d	Vnitřní průměr (Tab. 9)	[m]
ν	Součinitel kinematické viskozity (Příloha č. 1)	[m ² · s ⁻¹]

$$Re = \frac{20 \cdot 0,021}{0,000001675} = 250746,3 \Rightarrow \text{turbulentní} \quad [-]$$

8.2.2 Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín (příčné)

Objemový průtok spalín

$$\dot{V}^{sp} = V_{sp,s}^v \cdot \dot{m}_{pal} \cdot \left(\frac{273,15 + t_{stř,sp}}{273,15} \right) \quad (8.11)$$

$V_{sp,s}^v$	Objem spalín skutečných vlhkých (4.15)	[m ³ _N ·m ⁻³ _N]
\dot{m}_{pal}	Množství paliva (5.4)	[m ³ _N · s ⁻¹]
$t_{stř,sp}$	Teplota spalín středních (Tab. 9)	[°C]

$$\dot{V}^{sp} = 11,498 \cdot 2,1 \cdot \left(\frac{273,15 + 825}{273,15} \right) = 97,04 \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Průtočný průřez pro spaliny mezi trubkami

$$f_{sp} = A \cdot B - z_1 \cdot D \cdot A \quad (8.12)$$

A	Výška (Tab. 9)	[m]
B	Šířka (Tab. 9)	[m]
z_1	Počet trubek v řadě (Tab. 9)	[-]
D	Vnější průměr trubky (Tab. 9)	[m]

$$f_{sp} = 5 \cdot 2,415 - 48 \cdot 0,0025 \cdot 5 = \mathbf{6,075} \quad [\text{m}^2]$$

Rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{\dot{V}^{sp}}{f_{sp}} \quad (8.13)$$

\dot{V}^{sp}	Objemový průtok spalin (8.11)	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
f_{sp}	Průtočný průřez pro spalin (8.12)	$[\text{m}^2]$

$$w_{sp} = \frac{97,04}{6,075} = 15,97 \approx \mathbf{16} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Součinitel přestupu tepla konvekci na straně spalin (příčné obtékání)

$$\alpha_{sp} = C_s \cdot C_z \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \quad (8.14)$$

C_s	Korekční součinitel na počet řad (podél)	[-]
C_z	Korekční součinitel uspořádání	[-]
λ	Součinitel tepelné vodivosti (Tab. 10)	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
D	Vnější průměr trubky (Tab. 9)	[m]
Re	Reynoldsovo číslo (8.21)	[-]
Pr	Prandtlovo číslo (Tab. 10)	[-]

$$\alpha_{sp} = 0,37 \cdot 0,84 \cdot \frac{0,0779}{0,025} \cdot 2662,3^{0,6} \cdot 0,77^{0,33}$$

$$\alpha_{sp} = \mathbf{100,47} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Korekční součinitel na počet řad svazku – příčný

$$C_s = 0,275 \cdot \varphi_\sigma^{0,5} = 0,275 \cdot 1,78^{0,5} = \mathbf{0,37} \quad (8.15)$$

Parametr φ_σ

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma - 1} = \frac{2 - 1}{1,56 - 1} = \mathbf{1,78} \quad (8.16)$$

Poměrná rozteč – úhlopříčná

$$\sigma = \sqrt{0,25 \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0,25 \cdot 2^2 + 1,2^2} = \mathbf{1,56} \quad (8.17)$$

Poměrná rozteč – příčná

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{50}{25} = 1 \quad [-] \quad (8.18)$$

Poměrná rozteč – podélná

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{30}{25} = 1,2 \quad [-] \quad (8.19)$$

Korekční součinitel na počet řad svazku – podélný

$$C_z = 3,12 \cdot z_2^{0,05} - 2,5 = 0,84 \quad [-] \quad (8.20)$$

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{\omega_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \quad (8.21)$$

ω_{sp}	Rychlost spalin (Tab. 9)	$[m \cdot s^{-1}]$
D	Vnější průměr (Tab. 9)	$[m]$
ν_{sp}	Součinitel kinematické viskozity (Tab. 10)	$[m^2 \cdot s^{-1}]$

$$Re = \frac{16 \cdot 0,025}{0,00015} = 2662,3 \Rightarrow \text{turbulentní} \quad [-]$$

Vlastnosti spalin pro $t_{sp, stř}$, dle EES

	CO_2	H_2O	N_2	O_2	SUMA	
	0,09	0,191	0,707	0,012	1	[-]
λ	0,07043	0,1108	0,06999	0,07698	0,0779	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
ν	0,00008871	0,0002033	0,0001398	0,0001447	0,00015	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
Pr	0,7225	0,8796	0,7485	0,7429	0,771	[-]

Tab. 10 Vlastnosti spalin pro $t_{sp, stř}$, dle EES

8.2.3 Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

Dle literatury [1] se jako hranice, pod níž je podíl sálání na celkovém tepelném toku malý, uvádí 500 °C. Jelikož uvažujeme s teplotou spalin 1 100 °C na vstupu do ohříváku a s teplotou 550 °C na výstupu, je nutné provést i výpočet sálání na straně spalin. V našem případě při spalování zemního plynu určíme součinitel přestupu tepla sáláním pro čisté spaliny podle vztahu (8.22) a nomogramů z literatury [1].

Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalin

$$\alpha_{sál} = C_s \cdot \alpha \cdot \alpha_N \quad (8.22)$$

C_s	Opravný koeficient na teplotu proudu [1]	[-]
α	Stupeň černosti proudu spalin (8.23)	[-]
α_N	Nomogramový součinitel spalin [1]	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]

$$\alpha_{sál} = 0,935 \cdot 0,0682 \cdot 195$$

$$\alpha_{sál} = \mathbf{12,43} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Pro výpočet můžeme použít nomogramy dle [1], protože spaliny mají tlak okolí.

Stupeň černosti proudu spalin

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} \quad (8.23)$$

$k \cdot p \cdot s$	Optická hustota spalin (8.24)	[-]
---------------------	-------------------------------	-----

$$\alpha = 1 - e^{-0,0706} = \mathbf{0,0682} \quad [-]$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_s \cdot r_s) \cdot p \cdot s \quad (8.24)$$

$(k_s \cdot r_s)$	Součinitel zeslabení tříatomovými plyny (8.26)	[-]
p	Tlak spalin (viz zadání)	[MPa]
s	Tloušťka sálavé vrstvy pro hladké trubky (8.25)	[m]

$$k \cdot p \cdot s = (14,82) \cdot 0,103 \cdot 0,046 = \mathbf{0,0706} \quad [-]$$

Efektivní tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad (8.25)$$

D	Vnější průměr trubky (Tab. 9)	[m]
s_1	Podélná rozteč (Tab. 9)	[m]
s_2	Příčná rozteč (Tab. 9)	[m]

$$s = 0,9 \cdot 0,025 \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,05 \cdot 0,03}{0,025^2} - 1 \right) = \mathbf{0,046} \quad [\text{m}]$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8+16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{t_s+273,15}{1000} \right) \cdot r_s \quad (8.26)$$

r_{H_2O}	Objemová koncent. H ₂ O ve spalínách (8.27)	[-]
p_s	Parciální tlak (8.29)	[-]
s	Efektivní tloušťka sálavé vrstvy (8.25)	[-]
t_s	Střední teplota spalín (Tab. 9)	[-]
r_s	Objemová koncent. tříatomových plynů (8.28)	[-]

$$k_s \cdot r_s = \left(\frac{7,8+16 \cdot 0,192}{3,16 \cdot \sqrt{0,029 \cdot 0,046}} - 1,02 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{825+273,15}{1000} \right) \cdot 0,282$$

$$k_s \cdot r_s = 14,82 \quad [-]$$

Objemová koncentrace vodní páry ve spalínách

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O} + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha_s - 1) \cdot V_{vz,t}^s}{(V_{sp,t}^s + V_{H_2O}) + (\alpha_s - 1) \cdot V_{vz,t}^v} \quad (8.27)$$

V_{H_2O}	Objemová H ₂ O ve spalínách (4.10)	[m ³ _N ·m ⁻³ _N]
χ_v	Součinitel zvětšení vlhkosti vzduchu (4.3)	[-]
α_s	Přebytek vzduchu (viz zadání)	[-]
$V_{vz,t}^s$	Množství vzduchu teoretického suchého (4.2)	[m ³ _N ·m ⁻³ _N]
$V_{sp,t}^s$	Množství spalín teoretických suchých (4.12)	[m ³ _N ·m ⁻³ _N]
$V_{vz,t}^v$	Množství vzduchu teoretického vlhkého (4.4)	[m ³ _N ·m ⁻³ _N]

$$r_{H_2O} = \frac{2,196 + (1,021-1) \cdot (1,07-1) \cdot 9,595}{(9,161+2,196) + (1,07-1) \cdot 9,801} = 0,192 \quad [-]$$

Objemová koncentrace tříatomových plynů ve spalínách

$$r_s = r_{H_2O} + \left(\frac{V_{CO_2}}{(V_{sp,t}^s + V_{H_2O}) + (\alpha_s - 1) \cdot V_{vz,t}^v} \right) \quad (8.28)$$

r_{H_2O}	Objemová koncent. H ₂ O ve spalínách (8.27)	[-]
V_{CO_2}	Objem CO ₂ ve spalínách (4.8)	[m ³ _N ·m ⁻³ _N]
V_{H_2O}	Objemová H ₂ O ve spalínách (4.10)	[m ³ _N ·m ⁻³ _N]
$V_{sp,t}^s$	Množství spalín teoretických suchých (4.12)	[m ³ _N ·m ⁻³ _N]
$V_{vz,t}^v$	Množství vzduchu teoretického vlhkého (4.4)	[m ³ _N ·m ⁻³ _N]
α_s	Přebytek vzduchu (viz zadání)	[-]

$$r_s = 0,192 + \left(\frac{1,03}{(9,161+2,196) + (1,07-1) \cdot 9,801} \right) = 0,282 \quad [-]$$

Celkový parciální tlak tříatomových plynů ve spalínách

$$p_s = r_s \cdot p \quad (8.29)$$

r_s	Objemová koncent. tříatomových plynů (8.28)	[-]
p	Tlak spalín (viz zadání)	[MPa]

$$p_s = 0,282 \cdot 0,103 = \mathbf{0,029} \quad [\text{MPa}]$$

8.2.4 Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalín

Výsledný součinitel přestupu tepla na straně spalín se určuje součtem součinitelů přestupu tepla konvekcí a sáláním. U výpočtu nesmíme zapomenout na součinitel omývání teplosměnné plochy, který respektuje její neúplné omývání proudem spalín. To může nastat v případech, kdy konstrukční řešení teplosměnné plochy vytváří tzv. mrtvé kouty s omezenou možností proudění spalín nebo zkratových proudů.

V našem případě tento součinitel volíme $\omega = 1$ [-], protože předchází možné problémy při našem navrženém konstrukčním řešení nevznikají.

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_c = \omega \cdot \alpha_{sp} + \alpha_{sál} \quad (8.29)$$

ω	Součinitel omývání plochy [1]	[-]
α_{sp}	Součinitel přestupu tepla konvekcí, spalín (8.14)	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
$\alpha_{sál}$	Součinitel přestupu tepla sáláním, spalín (8.22)	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]

$$\alpha_c = 1 \cdot 100,47 + 12,43 = \mathbf{112,9} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

8.2.5 Součinitel prostupu tepla

Dle literatury [1] pro naši aplikaci použijeme zjednodušený tvar vyjádření součinitele prostupu tepla.

Součinitel prostupu tepla pro trubkové ohříváky vzduchu

$$k = \xi \cdot \frac{\alpha_c \cdot \alpha_{vz}}{\alpha_c + \alpha_{vz}} \quad (8.30)$$

ξ	Součinitel využití plochy [1]	[-]
α_c	Celkový souč. přestupu tepla, spalín (8.29)	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
α_{vz}	Souč. přestupu tepla konvekcí, vzduch (8.14)	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]

$$k = 0,95 \cdot \frac{112,9 \cdot 975,6}{112,9 + 975,6} = \mathbf{96,13} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

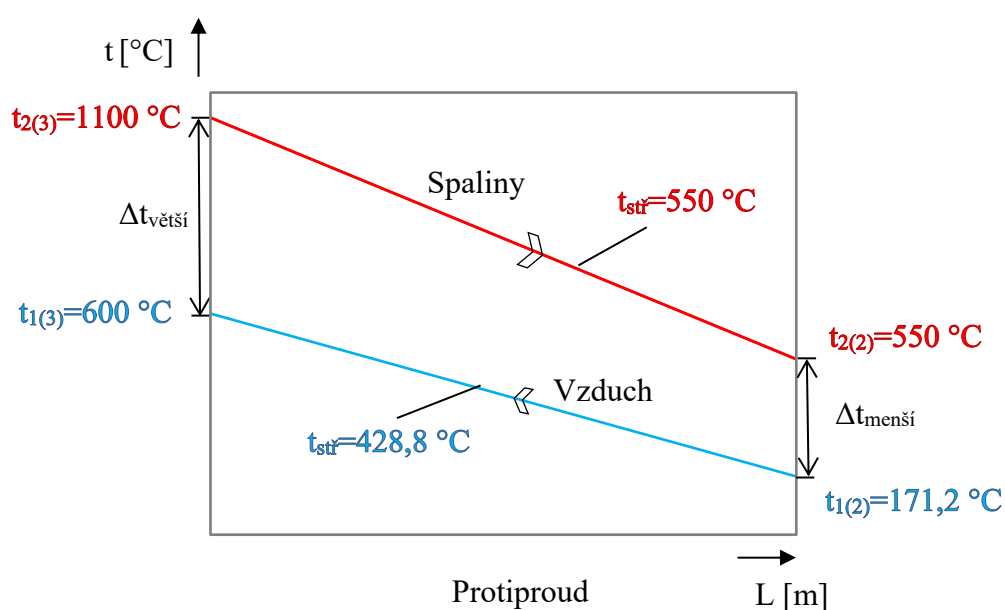
Střední teplotní logaritmický spád

$$\Delta t_{stř} = \psi \cdot \frac{\Delta t_{větší} - \Delta t_{menší}}{\ln \frac{\Delta t_{větší}}{\Delta t_{menší}}} \quad (8.31)$$

$\Delta t_{větší}$	Součinitel omývání plochy	[°C]
$\Delta t_{menší}$	Celkový souč. přestupu tepla, spalin (8.29)	[°C]
ψ	Součinitel kombinovaného proudění [1]	[-]

$$\Delta t_{stř} = 0 \cdot \frac{500 - 378,8}{\ln \frac{500}{378,8}} = 436,6 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Součinitel kombinovaného proudění ψ ignorujeme. Při počtu tahů větším než tři se korekce na křížový proud neprovádí a zapojení se považuje za čistě protiproudé [1].



Obr. 23 Průběh teplot v protiproudém výměníku

8.2.6 Teplosměnná plocha ohříváku vzduchu

Celková potřebná teplosměnná plocha

$$S = \frac{Q_{vz}}{k \cdot \Delta t_{stř}} \quad (8.32)$$

Q_{vz}	Výkon ohříváku vzduchu (5.1)	[W]
k	Součinitel prostupu tepla (8.30)	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
$\Delta t_{stř}$	Logaritmický teplotní spád (8.31)	[°C]

$$S = \frac{37\,985\,000}{96,13 \cdot 436,6} = 905,03 \quad [\text{m}^2]$$

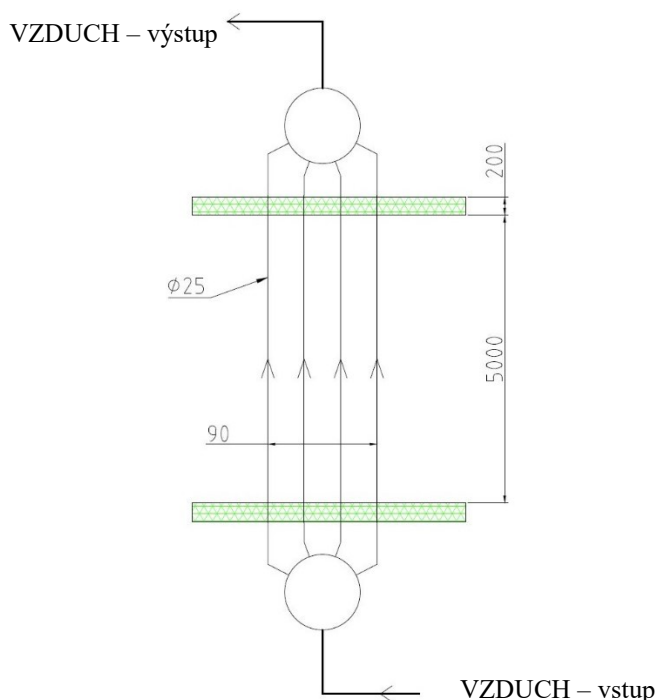
$S = 943,4 \text{ [m}^2\text{]}$ je celková teplosměnná plocha výměníku k zajištění požadované teploty vzduchu na jejím výstupu. Tuto celkovou plochu je třeba rozpočítat na námi uvažovaný díl skládající se ze tří jednotlivých svazků.

Plocha jednoho svazku

$$S_1 = \pi \cdot D \cdot (z_1 \cdot z_2) \cdot A \quad (8.33)$$

D	Vnější průměr trubky (Tab. 9)	[m]
z_1	Počet trubek – příčně (Tab. 9)	[-]
z_2	Počet trubek – podélně (Tab. 9)	[-]
A	Výška výměníku – trubek (Tab. 9)	[m]

$$S_1 = \pi \cdot 0,025 \cdot (48 \cdot 4) \cdot 5 = \mathbf{75,36} \quad [\text{m}^2]$$



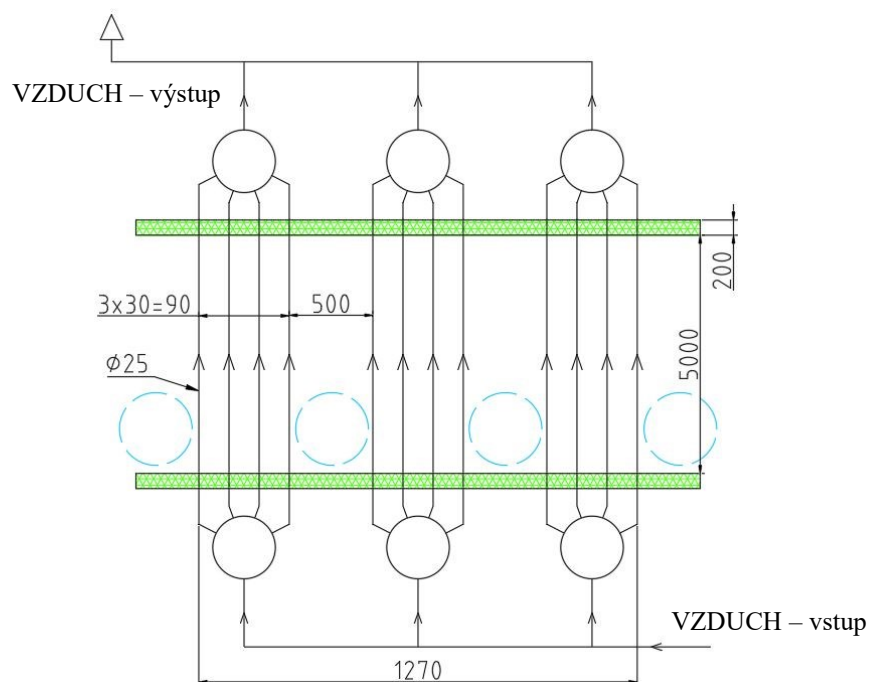
Obr. 24 Schématické znázornění jednoho svazku ohříváku

Plocha jednoho dílu (3 svazky)

$$S_{1,(3)} = S_1 \cdot x \quad (8.34)$$

S_1	Plocha jednoho svazku (8.33)	[m ²]
x	Počet svazků v jednom tahu (volím)	[-]

$$S_{1,(3)} = 75,36 \cdot 3 = \mathbf{226,2} \quad [\text{m}^2]$$



Obr. 25 Schématické znázornění jednoho dílu ohříváku (včetně průřezů)

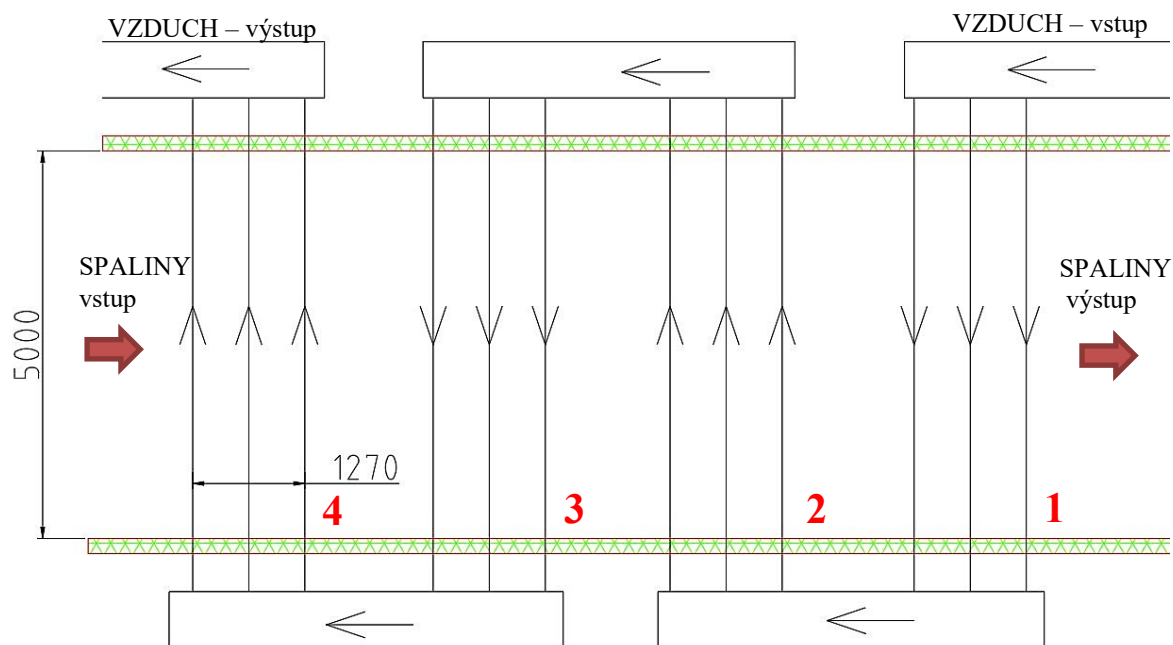
Počet dílů za sebou

$$n = \frac{S}{S_{1,(3)}} \quad (8.35)$$

S Celková potřebná teplosměnná plocha (8.32) $[\text{m}^2]$

$S_{1,(3)}$ Plocha jednoho dílu – 3 svazky (8.34) $[\text{m}^2]$

$$n = \frac{905,03}{226,2} = 4 \quad [-]$$



Obr. 26 Schématické znázornění celého tahu ohříváku

Skutečná plocha pro 4 díly:

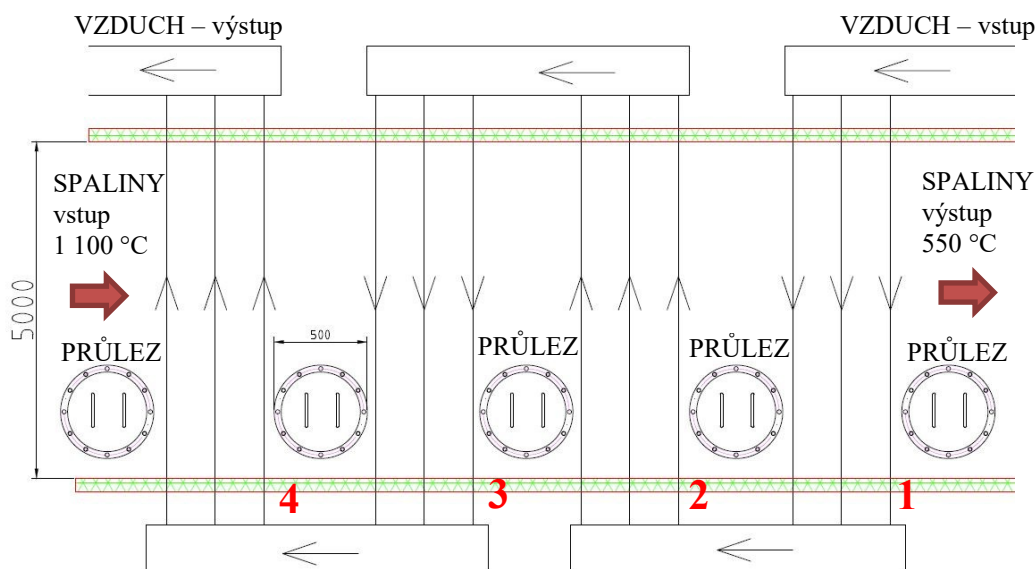
$$S = 226,2 \cdot 4 = 904,8 \text{ m}^2 \rightarrow \text{vyhovuje dle rovnice 8.32.}$$

Dle přechozích výpočtů se námi navržená konstrukce ohříváku vzduchu skládá ze čtyř dílů, z nichž každý díl obsahuje tři svazky. Celkem tedy má ohřívák vzduchu dvanáct jednotlivých svazků.

8.3 Záměr návrhu

Naší hlavní intencí při vytváření konstrukčního návrhu byla co nejjednodušší výroba celého ohříváku, možnost přepravy jednotlivých předem připravených bloků, jejich rychlá instalace na místě, kompaktnost a v neposlední řadě i 100 % míra opravitelnosti celého systému nejjednodušším možným způsobem. Avšak při snaze skloubení všech těchto požadavků jsme museli přistoupit k určitému kompromisu z našich nároků při návrhu.

U hlavního předkládaného návrhu jsme se ale drželi 100 % míry opravitelnosti i na úkor ostatních požadavků, a proto jsme instalovali průřezy i mezi svazky v jednom dílu (viz Obr. 25). Protože všechny 3 svazky v jednom dílu mají přibližně stejnou teplotu stěny, můžeme průřezy zrušit, tím se celková délka ohříváku vzduchu výrazně zkrátí. Z důvodu instalovaných průřezů mezi jednotlivé čtyři díly se nám celková délka výměníků protáhne o 2,5 metrů. Průřezy jsou instalované vždy před i za každým jedním dílem. Naznačení průřezů je vidět na Obr. 27.



Obr. 27 Schématické znázornění průřezů v ohříváku

Z důvodu tepelné roztažnosti materiálů a velkých rozdílů teplot v jednotlivých částech ohříváku volíme před i za každým dílem dilataci o tloušťce 100 mm. Celková délka výměníku včetně navržených průřezů a dilatací činí tedy 8,08 m. Trubkovnice prvního a druhého dílu volíme z materiálu 16Mo3 (žárupevná ocel pro vyšší teploty i tlaky), trubkovnici třetího dílu z materiálu 10CrMo9-10 (nízkolegovaná žárupevná ocel pro vyšší teploty i tlaky) a poslední tedy čtvrtý díl z materiálu 12CrMo19-5 (legovaná žárupevná ocel pro vysoké teploty a tlaky).

V úvaze je i další varianta konstrukce, kdybychom vyřadili průřezy, a jednotlivé díly tak nainstalovali těsně vedle sebe. Tím bychom ušetřili minimálně dva metry z celkové délky. Případné opravy by se řešily rozpojením celého vadného dílu, vysunutím a opravením mimo spalínový kanál. Poté by se opravený díl vložil zpět do kanálu a patřičně zapojil.

9. Základní regulační obvod

Při návrhu energetického zařízení se nelze zaměřovat jen na technicky správnou aplikaci vědeckých poznatků z oblasti spalování fosilních či alternativních paliv, sdílení tepla, přenosu tepla a hmoty, popřípadě materiálového inženýrství. Samozřejmě nemůžeme tyto disciplíny opomíjet, ale zároveň musíme myslet i na to, jak tyto zdroje spolehlivě a bezpečně provozovat, aby nám sloužili tak, jak byly navrženy.

V našem případě se zaměříme na základní regulační obvody EC CAES při výrobě elektrické energie. Pro přehlednost si je rozdělíme na dva samostatné regulační obvody, a to:

- Regulační obvod při výrobě elektrické energie z akumulace 1
- Regulační obvod při výrobě elektrické energie z akumulace 2

9.1 Regulační obvod při výrobě el. energie z akumulace 1

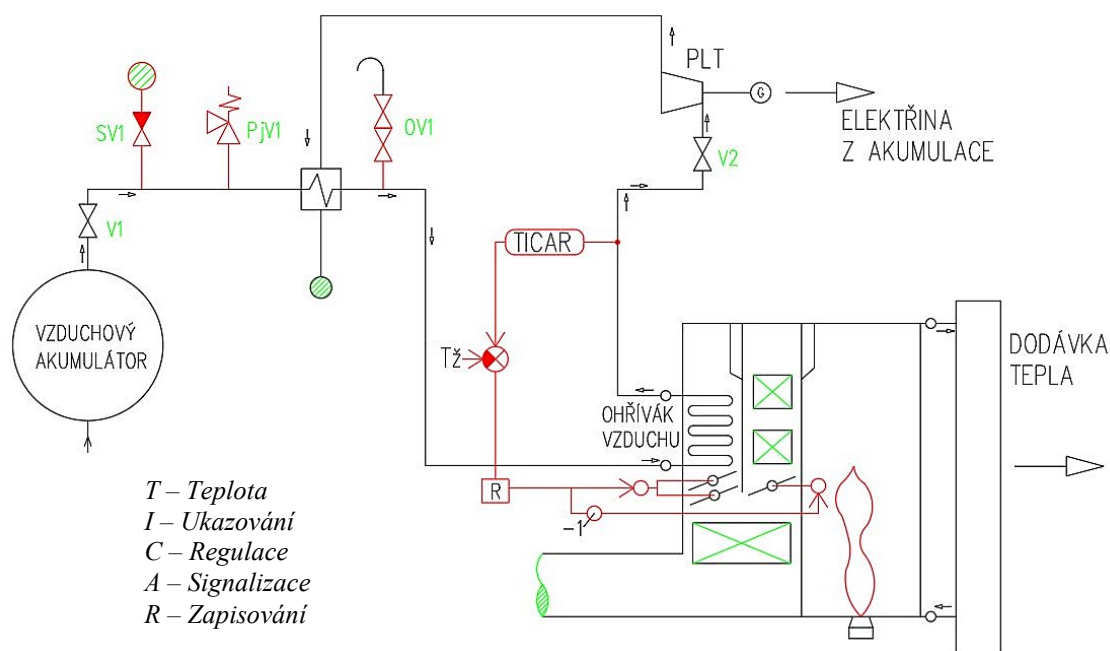
První P/I schéma je uvedeno na Obr. 28. Červenou barvou je zvýrazněna navržená regulace. Našimi regulovanými veličinami je teplota T_{vz} před vstupem na parní turbínu. Akční veličinou je pak průtok spalín přes ohřívák vzduchu. Akčním členem Klapa 2 a Klapa 3. Teplota vzduchu na výstupu z kotle se musí udržovat s požadovanou (předepsanou) tolerancí na určité optimální hodnotě stanovené výrobcem plynové turbíny. Aby nedošlo k přehřátí plynové turbíny je snímána teplota T_{vz} před vstupem na turbínu, porovnávána s teplotou žádanou T_z a v případě překročení požadované teploty je skrze regulátor předán signál na klapu, které zajistí změnu průtoku spalín přes ohřívák. Tím dosáhneme poměrně snadné a hlavně rychlé regulace. Při vyšší teplotě vzduchu se klapa u ohříváku vzduchu přivírá a současně se klapa u ohříváku vody.

9.1.1 Poruchový stav

Provádění oprav veškeré instalace v potrubí vzduchu lze provádět i za provozu kotle. Díky uzavření ventilů **V1**, **V2** zajistíme uzavření přívodu vzduchu a pojišťovací ventil **PjV1** zamezí vzniku přetlaku v tlakovém systému, který by mohl vzniknout při nechtěném

zahřívání zbytkového vzduchu v ohříváku, a tím rozpínání plynu. Při opravě se systém vypustí pomocí odvzdušňovacího ventilu **OV1**.

Naopak při odstavení kotle a jeho postupném ochlazování dojde k ochlazování vzduchu uvnitř tlakového potrubí. Tím může dojít k vytvoření podtlaku, který by mohl mít mnohem horší následky než dříve zmiňovaný přetlak. Vzniku podtlaku zamezíme sacím ventilem **SV1**, který v případě poklesnutí tlaku od určitou mezi nasaje do systému potřebné množství vzduchu.



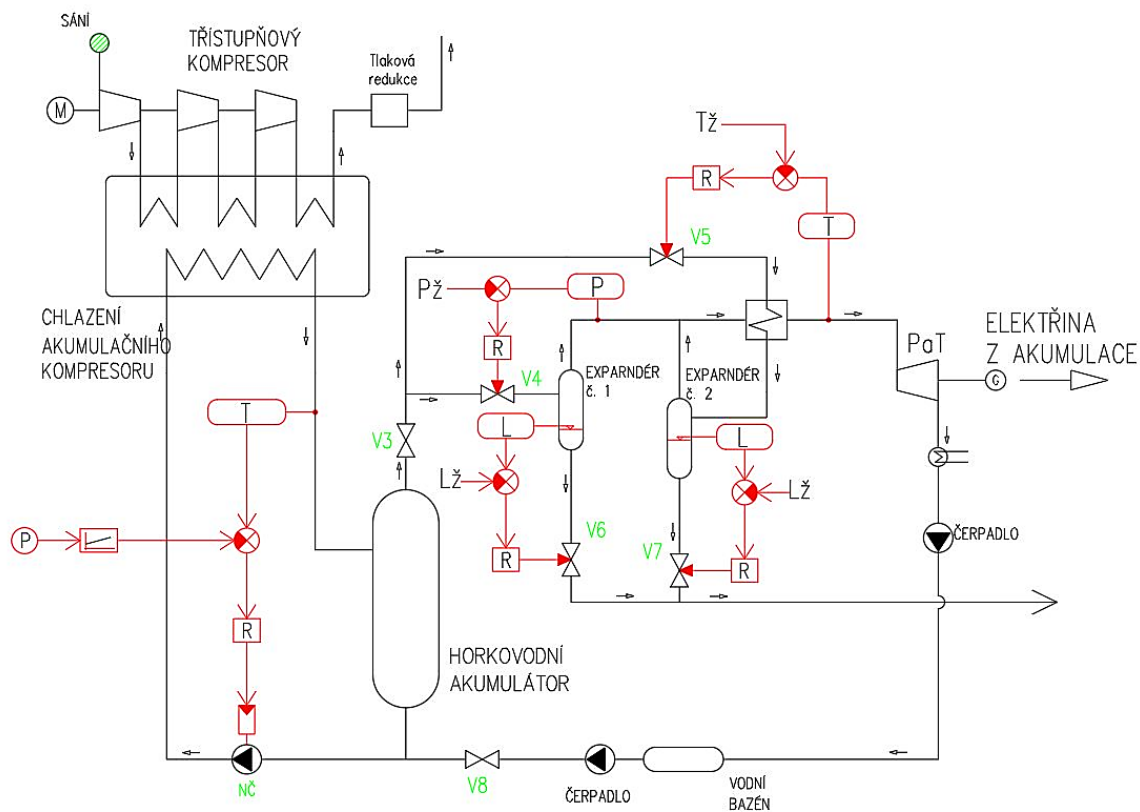
Obr. 28 P/I schéma zapojení přehřevu vzduchu

K zamezení vzniku poruchového stavu v důsledku přetlaku při provozu kotle i ohříváku vzduchu slouží pojistný ventil **PjV1**, který v případě překročení kritického tlaku odpustí část natlakovaného vzduchu do okolí atmosféry.

9.2 Regulační obvod při výrobě el. energie z akumulace 2

Následující P/I schéma (Obr. 29) akumulace odvedeného tepla z kompresoru obsahuje složitější regulační obvod. Zde opět měříme teplotu média (v tomto případě páry) T_p před vstupem na turbínu, porovnáváme s teplotou žádanou T_z a akčním členem-ventil **V5** regulujeme. K teplotě navíc přibude další regulovaná veličina P_p . Tu měříme za

expandérem č. 1, porovnáme s tlakem žádaným P_z . V regulátoru se zpracuje signál podle předem zadaného algoritmu a vyšle signál do akčního členu V_4 . V obou expandérech č. 1 a č. 2 měříme výšku hladiny L a regulujeme odpouštěním pomocí ventilů V_6 a V_7 . Poslední regulací je regulace teploty (akční veličina) chladicího média na výstupu z kompresoru. Zde je akčním členem napájecí čerpadlo $NČ$ s regulací otáček.



Obr. 29 P/I schéma akumulace systému horkovodního akumulátoru

10. Závěr

Zadáním této diplomové práce bylo navrhnout přehřívák vzduchu plynové turbíny v systému pro akumulaci elektrické energie EC CAES o teplotě vzduchu 600 °C, tlaku 3,784 MPa a hmotnostním průtokem 82,48 kg/s na výstupu z přehříváku. Ten bude vsazen jako jedna z teplosměnných ploch do druhého tahu horkovodního kotle, ve kterém se jako palivo spaluje zemní plyn s výhřevností 33,48 MJ/Nm³.

Cílem bylo tedy vypracovat výpočtový projekt přehřevu vzduchu včetně návrhu velikosti teplosměnné plochy v souladu s normalizovanými rozměry trubek. Výstupem práce se stal také projekční návrh daného přehříváku včetně hlavních rozměrů a v neposlední řadě i návržení a popsání základního regulačního oběhu na P/I schématu daného zapojení přehřevu vzduchu.

Úvodní kapitola této práce je věnována počátkům akumulace jako takové, jejím rozvojem a stručným popisem technologií spojených s uchováváním elektrické energie. Zde tvoří podstatnou část souhrnná charakteristika mechanických akumulátorů, které v současné době hrají ve velkokapacitní akumulaci elektrické energie stále významnou roli. Detailněji popisujeme PVE a systém CAES, na jehož vývoji se společně s VŠB–TUO podílí i společnost ORGREZ, a.s., zaměřující se na decentrální energetické zdroje s výkony akumulace do 15 MW, tedy pro klasické teplotenské zdroje. Námi předkládaná vyvíjená koncepce EC CAES představuje dva modely možného využití. Následně se již věnujeme danému modelu zapojení s horkovodním kotlem HWB dle zadání. Jsou zde detailně popsány jednotlivé režimy provozu se zaměřením na akumulaci, následnou výrobu elektrické energie z akumulace i bez ní (klasický režim).

Ze zadaného složení spalovaného zemního plynu byly provedeny stechiometrické výpočty, díky nimž jsme stanovili potřebné množství vzduchu, které je nezbytné pro spálení jednotkového množství paliva a objemu spalin, vznikajících při hoření. Z těchto zjištěných objemů jsme následně provedli tepelný výpočet přehřevu vzduchu. K určení potřebného tepelného výkonu přehříváku vzduchu bylo zapotřebí si stanovit teplotu spalin na vstupu a výstupu z výměníku. Při našich výpočtech počítáme s teplotou na vstupu 1 100 °C a s teplotou na konci teplosměnné plochy přehříváku 550 °C. Potřebný tepelný výkon je tedy 37,985 MW_t.

Abychom mohli pokračovat ve výpočtovém projektu, bylo potřebné si navrhnout základní parametry a rozměry spalovací komory. Navrhujeme svislou konstrukci se čtyřmi stropními hořáky s trajektorií plamene svisle dolů spalovací komorou. Celkový výkon horkovodního kotle činí $70,3 \text{ MW}_t$ s účinností až 96,14 %. Účinnost byla stanovena nepřímou metodou odečtením zjištěných tepelných ztrát kotle.

V následujících kapitolách byly provedeny detailní výpočty ke stanovení velikosti teplosměnné plochy. Ta je celá navržena z normalizovaných průměrů trubek a zvolených pevností materiálu pro dané teploty. Celková teplosměnná plocha čítá 905 m^2 . Tuto výslednou plochu podělíme plochou jednoho dílu skládajícího se ze tří svazků zapojených za sebou. Získáme výsledný počet čtyř dílů zapojených v sérii o celkové délce 8,08 m. Pro další fázi bychom museli provést přesný výpočet obsahující optimalizace roztečí s_1 a s_2 , výpočet tlakových ztrát, použití softwaru pro pásmový výpočet kotle a počítat každý svazek samostatně pro optimalizované rychlosti spalin, vzduchu a teplot.

V poslední kapitole bylo navrženo P/I schéma zapojení přehřevu vzduchu a naznačen základní regulační obvod včetně poruchových stavů. Také je zde popsáno i druhé P/I schéma akumulace systému horkovodního akumulátoru.

Diplomová práce *Přehřívák vzduchu plynové turbíny u energetické centrály s akumulací elektřiny (EC CAES) s horkovodním kotlem* prokázala reálnost této koncepce způsobu akumulace elektrické energie podle PV2018-215 původního provedení podle [20]. Integrací navrženého ohříváku vzduchu do systému akumulace je nutnou podmínkou pro dosažení vysoké účinnosti akumulace elektrické energie. Na základě prováděných simulací řešitelů, lze u této koncepce dosáhnout účinnosti elektrické akumulace nejméně 80 %. Přičemž elektrická účinnost akumulace je definována podílem čistého elektrického výkonu z akumulace ku příkonu akumulačního kompresoru. Čistým elektrickým výkonem je myšlen takový, který elektrárna dodává do elektrické sítě nezahrnující tzv. vlastní spotřebu (tj. spotřeba elektrické energie technologických zařízení samotné elektrárny).

Optimalizací lze dosáhnout i vyšší účinnosti elektrické akumulace, pokud bychom vzduch před expanzní turbínou přehříváli ještě na vyšší teplotu. Naše navržená teplota je dána parametry výrobce turbíny. Lze také s klesajícím tlakem z akumulátoru zvyšovat teplotu vzduchu před turbínou. Navržená koncepce i regulace tuto optimalizaci umožňuje.

11. Seznam použité literatury

- [1] DLOUHÝ, T.: *Výpočet kotlů a spalinových výměníků*. Praha: Česká technika, nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03757-7
- [2] ČERNÝ, V., JANEBA, B., TEYSSLER, J.: *Parní kotle*. Praha 1: SNTL – nakladatelství technické literatury, 1983.
- [3] KADLEC, Z.: *Průvodce sdílení tepla pro požární specialisty*. Ostrava: SPBI Spectrum, 2009. ISBN 978-80-7385-061-6
- [4] KADLEC, Z., BLAHOŽ, V.: *Základy sdílení tepla*. 2. vyd. Ostrava: SPBI Spectrum, 2000. ISBN 80-9020001-1-7
- [5] KYSELA, L.: *Využití druhotných zdrojů energie*. Poznámky k přednáškám Ostrava: SPBI Spectrum, 2008.
- [6] VÍT, T.: *Základy přenosu tepla a hmoty II*. Pomůcka pro přednášky a cvičení. Ostrava 1998.
- [7] Index od 361/vyuka. [online]. [cit. 2017-12-20]. Dostupné z: <http://fs1.vsb.cz/361/vyuka/>.
- [8] ČEZ, a.s. *Miniencyklopedie*. [online]. [cit. 2017-12-30]. Dostupné wz: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/zaj10.htm>.
- [9] TZB INFO, *Současné možnosti akumulace elektrické energie*, [online]. [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: http://www.tzb-info.cz/docu/clanky/0080/008065_Radil_Baterie.pdf.
- [10] OENERGETICE.CZ, *Infografika: Česká energetika v 21. století*, [online]. [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/energetika-v-cr/infografika-ceska-energetika-21-stoleti/>.
- [11] WIKIPEDIA, *Flywheel energy storage*, [online]. [cit. 2018-01-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel_energy_storage.

- [12] OENERGETICE.CZ. *Ani vodní elektrárny nejsou bezrizikovým energetickým zdrojem.* [online]. [cit. 2018-27-01].
Dostupné z: <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/vodni-elektrarny-nejsou-bezrizikovym-energetickym-zdrojem/>.
- [13] BAČA, P., DVOŘÁK, P.: *Akumulace elektřiny*, [online]. [cit. 2017-3-18].
Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>
- [14] OENERGETICE.CZ, *Průtoková baterie* [online]. [cit. 2018-02-01].
Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/prutokova-baterie/>.
- [15] VILIMEC, L., KONVIČKA, J. All for Power. *Akumulace elektřiny u decentralních energetických zdrojů.* [online]. [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/akumulace-elektriny-u-decentralnich-energetickych-zdroju/>.
- [16] VILIMEC, L., KONVIČKA, J., MAIER, M. All for Power. *Zaměření vývoje koncepce technologie pro akumulaci elektřiny u decentralních kogeneračních energetických.* [online]. [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/zamereni-vyvoje-koncepce-technologie-pro-akumulaci-elektriny-u-decentralnich-kogeneracnich-energetickych-zdroju/>.
- [17] VILIMEC, L., JOSIEK, J.: *Materiály a pevnostní dimenzování částí parních generátorů.*, Ostrava: 2011. ISBN 978-80-248-2512-0
- [18] VILIMEC, L., KONVIČKA, J.: *Energetika a životní prostředí, VŠB–TU Ostrava, 30. 8. – 1. 9. 2017. Akumulace elektřiny u decentralních energetických zdrojů.*
- [19] KADLEC Z., termo J.: *Termomechanika: návody do cvičení.*, 2. vydání, Ostrava: 2011. ISBN 978-80-248-1736-1.
- [20] VILIMEC, L., KONVIČKA, J.: *Způsob a zařízení pro akumulaci elektrické energie a tepla s akumulací médií*, Ostrava, 4. 5. 2018. PV2018-215
- [21] BARON, O.: *Návrh výměníku pro využití spalín z krokové pece ve VUHŽ Dobrá* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2018-05-20].
Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/109733>. Bakalářská práce. VŠB–TUO.

12. Seznam obrázků

Obr. 1 Denní průběh spotřeby elektrické energie [8]	18
Obr. 2 Procentuální koláč zdrojů podílejících se na výrobě elektrické energie v ČR [10].....	19
Obr. 3 Řez součástí typického magnetického setrvačníku [11]	21
Obr. 4 Zjednodušené schéma PVE Dalešice [12]	22
Obr. 5 Schéma principu CAES akumulace	23
Obr. 6 Přehled chemických reakcí a svorkového napětí vybraných typů akumulátorů [13].....	25
Obr. 7 Schéma průtokové baterie [14]	26
Obr. 8 Provedení s kogenerační jednotkou s plynovou turbínou (EC CAES – KGJ) [18].....	30
Obr. 9 Provedení s horkovodním kotlem [18].....	31
Obr. 10 Schéma klasického režimu HWB	32
Obr. 11 Schéma režimu nabíjení (akumulace)	33
Obr. 12 Zjednodušené schéma režimu vybíjení (výroba špičkové elektrické energie)	34
Obr. 13 Schéma přiřazení jednotlivých bodů do systému.....	41
Obr. 14 Schéma tepelných ztrát kotle	44
Obr. 15 Schéma kotle a výměňkové stanice	46
Obr. 16 Ztráta sdílením tepla do okolí [1].....	48
Obr. 17 Půdorys spalovací komory	52
Obr. 18 Základní rozměry spalovací komory.....	53
Obr. 19 Náčrt uvažované koncepce kotle.....	54
Obr. 20 Schéma uspořádání jednoho svazku ohříváku (půdorys).....	55

Obr. 21 Schéma jednoho svazku ohříváku (bokorys)	56
Obr. 22 Hustota vzduchu při dané teplotě a tlaku	57
Obr. 23 Průběh teplot v protiproudém výměníku	64
Obr. 24 Schématické znázornění jednoho svazku ohříváku.....	65
Obr. 25 Schématické znázornění jednoho dílu ohříváku (včetně průlezů)	66
Obr. 26 Schématické znázornění celého tahu ohříváku	66
Obr. 27 Schématické znázornění průlezů v ohříváku.....	67
Obr. 28 P/I schéma zapojení přehřevu vzduchu	70
Obr. 29 P/I schéma akumulace systému horkovodního akumulátoru	71

13. Seznam grafů

Graf 1 Složení zemního plynu.....	36
Graf 2 Vybíjecí cyklus vzduchového akumulátoru rozdělen do úseku 1 hodiny.....	40
Graf 3 Tepelné ztráty kotle [%].....	49

14. Seznam tabulek

Tab. 1 Základní srovnání technologií akumulace	27
Tab. 2 Závislost parciálního tlaku vodní páry na teplotě vzduchu [1]	37
Tab. 3 Přehled základních parametrů během procesu vybíjení	41
Tab. 4 Tabulka teplot spalin pro varianty A, B a C	42
Tab. 5 Potřebné množství spalin	42
Tab. 6 Koeficienty pro výpočet c_p	43
Tab. 7 Výpočet měrné tepelné kapacity spalin pro $t_{stř,sp} = 825\text{ °C}$	43
Tab. 8 Potřebné množství paliva	44
Tab. 9 Parametry ohříváku vzduchu	56
Tab. 10 Vlastnosti spalin pro $t_{sp,stř}$, dle EES	60

15. Seznam příloh

Příloha č. 1: Podpůrné výpočty v programu Engineering Equation Solver (EES)

Příloha č. 2: P/I schéma systému akumulace

Příloha č. 3: Sestava kotle